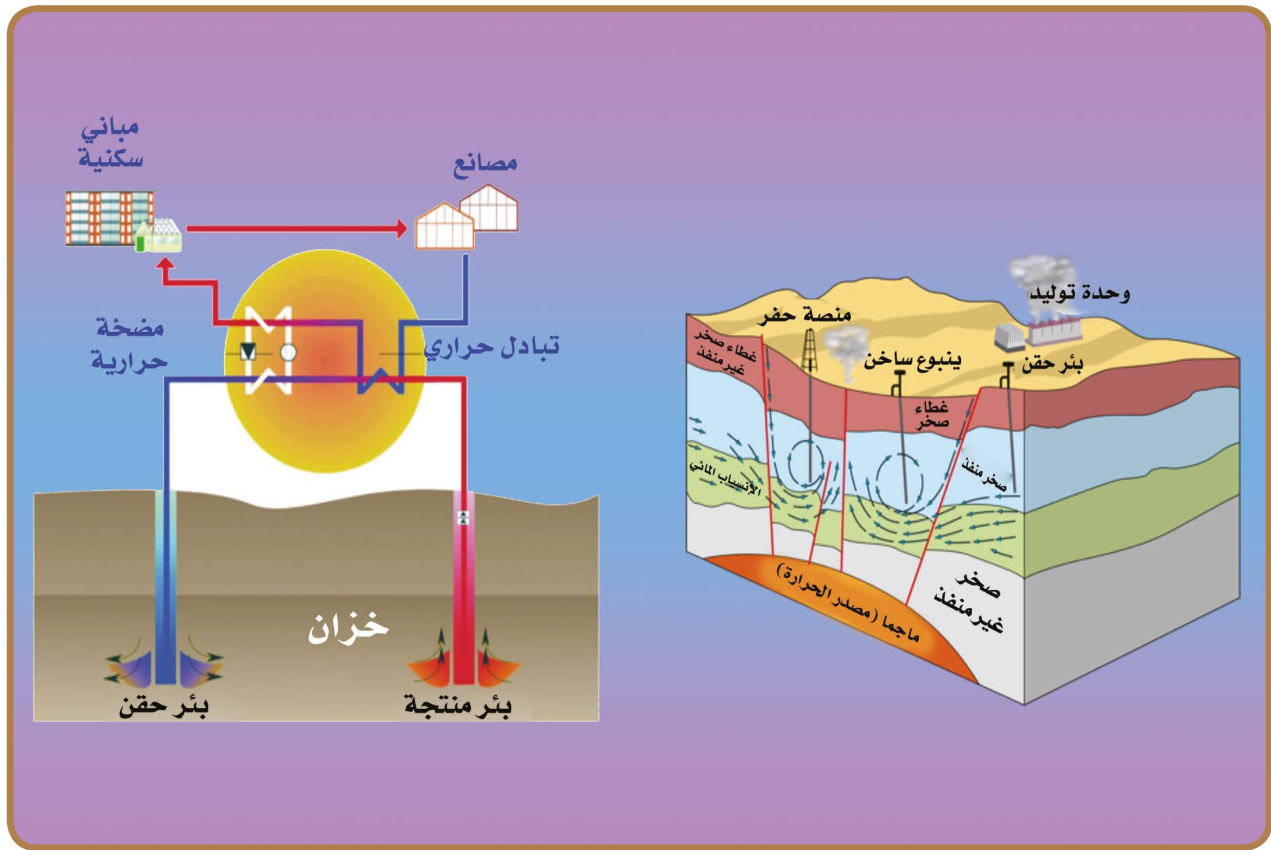
المجلة العربية للعلوم الجيولوجية
Arabian Journal of Geosciences

جامعة الملك سعود
King Saud University

الجمعية السعودية لعلوم الأرض
Saudi Society for Geosciences

20
Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences
موسوعة العمري في علوم الأرض

الطاقة الحرارية الأرضية



عبد الله بن محمد العمري
قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤ هـ - ٢٠٢٣ م



www.alamrigeo.com



فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر
العمري ، عبدالله بن محمد سعيد
الطاقة الحرارية الأرضية. / عبدالله بن محمد سعيد العمري - ط١.- الرياض، ١٤٤٤هـ
٢٠٨ ص ، ٢١,٥ X ٢٨
ردمك: ١-٢٥٦٣-٠٤-٦٠٣-٩٧٨
١ - الطاقة الحرارية أ. العنوان ب. الموسوعة
ديوي ٥٣١,٦٤٨ ٢٣١١ / ١٤٤٤

رقم الإيداع ٢٣١١ / ١٤٤٤
ردمك: ١-٢٥٦٣-٠٤-٦٠٣-٩٧٨

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com





للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال +966505481215 هاتف +966 11 4676198

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com

الطبعة الأولى

١٤٤٤هـ / ٢٠٢٣م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ وَفِي ٱلْأَرْضِ ءَايَٰتٌ لِّلْمُوقِنِينَ ﴾

[سورة الذاريات : آية 20]

﴿And on the Earth are Signs for Those Whose Faith is Certain﴾



موسوعة العمري في علوم الأرض



تمهيد

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة المجانية والتي تعتبر الأضخم عالمياً على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 6000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجـــزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

- 🕮 تقدير عمر الأرض
- 🕮 التركيب الداخلي للأرض
- 🕮 شكل الأرض وحركاتها
- 🕮 المعادن والتعدين
- 🕮 الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها
- 🕮 المد والجزر

الجـزء الثانـي من الموسوعة يشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

- 🕮 موجات التسونامي
- 🕮 البراكين وسبل مجابهتها
- 🕮 الزلازل والتفجيرات
- 🕮 جيولوجية القمر
- 🕮 تقييم مخاطر الزلازل
- 🕮 الأغلفة المحيطة بالأرض

الجزء الثالث يتألف من ستة كتب يربط كل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية والطبيعية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- المشاكل البيئية وحلولها
- الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات
- التغيرات المناخية والاحتباس الحراري
- الأمطار والسيول والسدود
- التشجير: التحديات والحلول
- التصحر والجفاف

الجـزء الرابـع يتكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى نووياً وطبياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- مستقبل الطاقة في عالمنا
- الجيوفزياء النووية
- الطاقة الحرارية الأرضية
- الجيولوجيا الطبية
- هل إنتهى عصر النفط؟
- دليل كتابة الرسائل والنشر العلمي

أما **الجـزء الخامـس** يتألف من ستة كتب متخصصة في العلوم الجيولوجية مكونة من 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

321 سؤال وجواب في تطور الأرض
358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد والـ GIS
358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية
380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية
303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية
300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية



مُقَدِّمَة

الطاقة الحرارية الأرضية Geothermal هي مصدر لا ينضب من الطاقة الحرارية والكهربائية على نطاق الزمن البشري. استخدامه صديق للبيئة ويوفر طاقة الحمل الأساسي.

لا يعتمد مصدر الطاقة هذا على الطقس، ويوفر الطاقة على مدار 24 ساعة في اليوم و7 أيام في الأسبوع. يؤدي استخدام الطاقة الحرارية الأرضية إلى زيادة الناتج الصافي الإقليمي والمحلي، ويخفف الاعتماد على الوقود الأحفوري ويساعد في الحفاظ على الموارد الكيميائية القيمة للمستقبل. توفر موارد الطاقة الحرارية الأرضية العميقة طاقة حرارية وكهربائية (حرارية محولة) ومن ثم توفير طاقة موثوقة للمستقبل.

يؤدي استخدام الموارد الحرارية الأرضية العميقة إلى استخراج السوائل الساخنة من الخزانات الحرارية. يجري إعادة هذه المياه الساخنة إلى الخزانات، ومن ثم الحفاظ على التوازن الطبيعي والسماح بإدارة مستدامة ومقتصدة للموارد.

تتميز منشآت الطاقة الحرارية الأرضية ومحطات الطاقة بالاستخدام الصغير للأراضي. ومن ثم فإنّ التأثير البصري على المناظر الطبيعية ضئيل (جانب مُهمٌّ بشكل خاصٍّ في المناطق المكتظة بالسكان).

يمكن أن توفر الطاقة الكهربائية التي تنتج من موارد الطاقة الحرارية الأرضية مساهمة مُهِمَّة في إمدادات الطاقة الكهربائية للحمل الأساسي وقد تحل محل محطات الطاقة الكبيرة الحجم التي تعمل بالوقود الأحفوري.

حقق استخدام الطاقة الحرارية الأرضية من الموارد الضحلة لإنتاج الطاقة عند درجات حرارة منخفضة لتطبيقات التدفئة والتبريد تقدماً هائلاً في العقد الماضي.

يمكن أن تسهم الطاقة الحرارية الأرضية من المصادر والخزانات العميقة في توفير طاقة حمل أساسية كبيرة. يمكن تركيب التكنولوجيا اللازمة للأنظمة الحرارية الأرضية المحسنة Enhanced Geothermal Systems (EGS) في كل مكان تقريباً. ومع ذلك، فإن هذه التقنية تحتاج إلى مزيد من التحسينات والبحث. من شأن المشروعات الناجحة أن تساعد في زيادة تعميمها.

يمكن أن يؤدي الجمع الذكي لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية مع مصادر أخرى للطاقة المتجددة إلى تحقيق فوائد مستدامة. بالنسبة للمنازل السكنية، على سبيل المثال، أثبت أن الجمع بين أنظمة المضخات الحرارية الأرضية والأنظمة الحرارية الشمسية ذات فعالية عالية في استخدام الطاقة. يمكن دمج الطاقة الحرارية الأرضية من نظام حراري مائي عميق مع تركيب غاز طبيعي لتحسين كفاءة الطاقة.

سنتعرف في هذا الكتاب على تاريخ تطور استخدام الطاقة الحرارية الأرضية ومصادرها وكيفية استخراجها واستخداماتها وأنواع محطات الطاقة الحرارية الأرضية، وعيوبها وآثارها في البيئة والمجتمع مع تسليط الضوء على بعض التجارب التي نفذتها بعض الدول في العالم.

نتطلع إلى مزيد من التطور السريع لهذا المصدر الرائع للطاقة في السنوات القادمة. الذي سيوفر للجميع إمداداً موثوقًا به وموفراً وصديقًا للبيئة من الطاقة الحرارية والكهربائية. كما نأمل أن نسهم في الاستخدام المستدام للطاقة مع هذا الكتاب.

الطاقة الحرارية الأرضية (نبذة تاريخية)

لقد استخدمت البشرية الطاقة الحرارية الأرضية منذ وجودها. فقد استخدمت الينابيع الساخنة والمسابح الساخنة للاستحمام والعلاج الصحي، وكذلك لطهي الطعام أو توفير ملاذ من مناخ الشتاء القارس.

كما استخدم المورد لإنتاج الأملاح من المحاليل الملحية الساخنة. بالنسبة للإنسان الأول، كان للحرارة الداخلية والينابيع الساخنة للأرض معنى ديني وأسطوري. فقد كانت أماكن الآلهة، أو كانت تمثل الآلهة أو موهوبة بالقُوى الإلهية. في العديد من المجتمعات الحديثة، لا يزال الاستحمام في منتجعات الينابيع الساخنة يحافظ على معنى الاحتفال الإلهي.

الينابيع الطبيعية، حيث تنبع المياه من باطن الأرض، كانت رمزاً للحياة والقوة في جميع الأديان والحضارات. إن الأهمية الأسطورية للينابيع التي تنتج المياه الساخنة والمعدنية جدّاً والتي تترسب منها المعادن وتشكل القشور والرواسب المعدنية غير العادية كانت ولا تزال هائلة.

كانت الينابيع الحرارية لها وظيفة دينية واجتماعية منذ البداية. تُنسب قوة الشفاء الإلهية إلى الينابيع الساخنة، حيث كانت الآلهة قريبة. وبذلك صارت الينابيع الحرارية والمنتجعات الصحية مراكز للتطور الثقافي والحضاري.

كانت منتجعات الينابيع الساخنة في الإمبراطورية الرومانية وعند السلالات الصينية الوسطى والإمبراطورية العثمانية مراكز لاستخدام المياه المعدنية، حيث جرى الجمع بين الصحة البدنية والنظافة (المصطلح الحديث: العافية) والمحادثات الثقافية والسياسية والتقدم في ذلك الوقت.

الينابيع الساخنة الطبيعية (أونسن Onsen) عديدة وتحظى بشعبية كبيرة في جميع أنحاء اليابان. لكل منطقة في البلاد نصيبها من الينابيع الساخنة والمدن السياحية التي تأتي معها. توجد أنواع عديدة من الينابيع الحارة، وتتميز بالمعادن الذائبة في الماء.



ينابيع هواكين الساخنة بالقُرْب من مدينة شيان، الصين.

توفر المعادن المختلفة فوائد صحية مختلفة، ومن المفترض أن يكون لجميع الينابيع الساخنة تأثير مريح على جسمك وعقلك. تأتي حمامات الينابيع الحارة في العديد من الأصناف، في الداخل والخارج، مفصولة بين الجنسين ومختلطة، متطورة وغير متطورة.

تنتمي العديد من حمامات الينابيع الساخنة إلى ريوكان، في حين أن البعض الآخر عبارة عن حمامات عامة. يُنصح بشدة بالإقامة لليلة واحدة في الينابيع الساخنة اليابانية لأي زائر لليابان.



كانت الينابيع الساخنة (ولا يزال من الممكن اعتبارها) رسلًا للطاقات الهائلة المخزنة في باطن الأرض على كوكب الأرض.

• الاستخدام المبكر للطاقة الحرارية الأرضية

تثبت الاكتشافات الأثرية أن هنود أمريكا الشمالية استخدموا الينابيع الحرارية الأرضية قبل 10000 عام على الأقل. كانت الينابيع الساخنة في ولاية ساوث داكوتا (الولايات المتحدة الأمريكية) ساحات قتال بين قبائل سيوكس وشيان. تُعزى قُوى الشفاء من أعماق الأرض إلى المياه الساخنة من الينابيع.

ويشهد حوض الاستحمام المنحوت في الصخور عند الينابيع استخدام المياه من قِبَل الهنود للاستحمام العلاجي. كما أنهم شربوا مياه الينابيع الساخنة لعلاج المشكلات الصحية المعدية المعوية. في وقت لاحق، بدأ المستوطنون البيض في استخدام الينابيع الساخنة لأغراض تجارية.

وقد عثر على (الينابيع الساخنة الهندية) مماثلة على طول ريو غراندي في تكساس والمكسيك. حيث استخدمها سكان أمريكا الشمالية الأصليون أيضاً لأغراض علاجية وللاستحمام في بِرك الصخور منذ زمن بعيد.

كانت توجد ميزة خاصة في النبع المسمى مخروط صيد السمك الحار المغمورة بالمياه بالقُرْب من شاطئ بحيرة يلوستون، وكان الصيادون يمسكون بالصنارات مع الأسماك التي لا تزال تتقلب للطهي في الحفرة الصغيرة المغلية والبخارية إما من القارب وإما من الشاطئ. غرق نبع مخروط صيد السمك الحار اليوم في مياه البحيرة وتوقف ثوران الماء الساخن.



نبع مخروط صيد السمك الحار في بحيرة يلوستون (حديقة يلوستون الوطنية، الولايات المتحدة الأمريكية) كان يستخدم لطهي السمك.

تصف الوثائق التاريخية المكتوبة التي كتبها الرومان واليابانيون والأتراك والآيسلنديون وأيضاً الماوري في نيوزيلندا استخدام الينابيع الساخنة في الطهي والاستحمام وتدفئة المنزل. وقبل نحو 2000 عام، أقيمت مراكز الاستحمام والعلاج في الينابيع الساخنة هوانكوينشي Huaquingchi وزياوتانغشان Ziaotangshan بالقُرْب من بكين في الصين.

قبل نحو 3000 عام، ارتبطت آلهة الحضارة اليونانية بالمياه الحرارية والمعدنية وقوتها العلاجية. فقد شجع الطبيب اليوناني أبقراط (460-320 قبل الميلاد) الفوائد الصحية للاستحمام الساخن.

وفي القرن الثالث إلى القرن الأول قبل الميلاد عبد السلتيون الينابيع بقوة الشفاء، على سبيل المثال الينابيع الحرارية في تبليتسه في شمال بوهيميا. وترتبط باث (باث هي مياه سول، إله الحكمة) في جنوب إنجلترا بعلاج الملك بلادود، والد الملك لير، من الجذام عام 863 قبل الميلاد.

وقد بنى الرومان الأضرحة في الينابيع الساخنة، وكثير منها يقدم أدلة أثرية على أن الناس سعوا للتواصل مع الآلهة. في ضريح الإلهة مينيرفا في باث -على سبيل المثال- اكتشف علماء الآثار 130 لوحًا من الرصاص كتب عليها الناس مناشدات مختلفة للآلهة للحصول على المساعدة.

من الواضح أن السلتيين، ثم الرومان على وجه الخصوص، استخدموا الينابيع الحرارية على نطاق واسع في وسط أوروبا. قبل أكثر من 2000 عام، قام الرومان بتسخين حماماتهم باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية.

وقد كتب المؤلف الروماني بليني الأكبر (23-79م) عن الفوائد الخاصة للحمامات المعدنية الساخنة للأشخاص الذين يعانون من العضلات أو المفاصل أو الشلل والأمراض.

كما ثبت أن الرومان استقروا بشكل مفضل بالقُرْب من الينابيع الحرارية اعتباراً من القرن الثاني قبل الميلاد. ومن الأمثلة على ذلك إيكس إن بروفانس (إيكس سيكستيا)، وباغنيريه دي لوشون في جبال البرانس وفيسبادن ألمانيا (أكوي ماتياشي)، وبادن بادن ألمانيا (أكوي أوريللي)، وبادينفيلر (فيلات أكوا) والعديد من الأماكن الأخرى.

لا توجد حقبة أخرى من الحضارة الغربية احتفلت بثقافة الاستحمام بسعادة أكبر من الفترة الرومانية الكلاسيكية. كان شعار الرومان هو (الصحة من خلال الماء) «Sanus Per Aquam». وكان الاستحمام أهم هواية عند الرومان. كانت العافية

جانباً مركزيّاً في أسلوب حياتهم؛ كان الاستحمام وليمة لجميع الحواس. كما كان الحمام مكاناً للتجمعات الاجتماعية، ويستخدم لشؤون الأعمال والرياضة.

في العصر الروماني، قدمت المنتجعات الصحية برامج استحمام منتظمة، التي كانت مرتبطة بشكل أساسي بالإيمان بالآلهة المسؤولة عن الصحة. كان المسؤولون عن نجاح العلاج في المقام الأول هم آلهة الينابيع المحلية مثل الإله السلتي الروماني أبولو غرانوس وليس الكثير من أخصائيي العلاج بالمياه المعدنية المدربين جيداً. في المنتجعات الرومانية، تبرع المرضى المعالجون بالصفائح المقدسة Sanctified Platelets للتعبير عن امتنانهم للإنجاز السماوي.

على سبيل المثال، جرى استخدام الينابيع الساخنة في بادينفيلر Badenweiler في الغابة السوداء (ألمانيا) من قِبَل السلتيين (المعروفين من اكتشافات العملات المعدنية). بعد فترة وجيزة من الفتح الروماني للأراضي الواقعة شرق نهر الراين في نهاية القرن الأول قبل الميلاد.

أقام الغزاة مستوطنة مدنية وبيت استحمام. خلال العصر الروماني، لا بد أن المياه كانت أكثر دفئًا من 26.4 درجة مئوية اليوم، لأن الرومان بنوا قاعات الاستحمام الكبيرة بدون أنظمة تدفئة.

كما أن تمعدن المياه كان على الأرجح أعلى مما هو عليه اليوم حتى في عام 1560 وفقًا لـ (دليل السفر إلى المنتجع الصحي) (Badenfahrtbüchlein) لجورجيوس بيكتوريوس. بعد انسحاب الرومان، غرق المنتجع الصحي في غياهب النسيان. ثم أعيد اكتشافه في عام 1784.

تعود مستوطنة بادن بادن الرومانية أكوا أوريلا (Aquae Aureliae)، في سفوح شمال الغابة السوداء، إلى القرن الأول للميلاد. وقد تطورت لتصير مدينة



إدارية مُهمَّة خلال القرنين الثاني والثالث. كانت أكوا أوريلا مدينة مزدهرة في مقاطعة ألأمانيا العليا Germania Superior الرومانية.

تركزت المدينة الرومانية على الينابيع الحرارية العلاجية التي كانت مصدر النجاح الاقتصادي والأهمية. يقع المنتجع الصحي الإمبراطوري الفاخر الذي بُني بأمر من الإمبراطور الروماني كركلا أسفل ساحة السوق حالياً في بادن بادن. وقد دمر المنتجع الصحي في عام 260م. يقع منتجع الجندي الأكثر اقتصاديّاً بشكل واضح على مسافة ما من المنتجع الصحي الإمبراطوري. كانت المنتجعات الرومانية المريحة جدّاً من الناحية الفنية مؤسسات متطورة ومزدهرة جدّاً.

بُنيت المنتجعات الصحية بما يسمى بنظام الهايبوكوست (Hypocaustum) للتدفئة المركزية وتحت الأرضية، وبعبارة أخرى بنظام التدفئة الحرارية الأرضية. استخدم الرومان المنتجعات الصحية وهم يرتدون الصنادل الخشبية لحمايتهم من الأرضيات الساخنة.



المنتجع الصحي الحراري في بادن بادن، منتجع الجندي الروماني، نظام تدفئة تحت الأرضية، أول نظام تدفئة حرارية أرضية.



جرى التخلي عن العديد من المنتجعات الصحية بعد انسحاب الرومان من مناطق واسعة من أوروبا. وقد فضّل المسيحيون الأوائل بناء الكنائس الأولى بالقُرْب من الينابيع الساخنة العلاجية التي استخدمت منذ العصور القديمة.

في أوروبا الوسطى، كانت الينابيع الحرارية في العصور الوسطى ذات أهمية هائلة على سبيل المثال. قام شارلمان (شارل الأكبر) بتوسيع المقعد الإمبراطوري في آخن إلى فناء له وفي عام 794م أعلنه مقر إقامته الدائم.

استخدمت الينابيع الحرارية لآخن بالفعل من قِبَل السلتيين والرومان ولكنها سقطت في النسيان لعدة مئات من السنين. تقول الأسطورة إن شارلمان كان في رحلة صيد بالقُرْب من آخن، وسط بقايا متضخمة من العصر الروماني. ثم علق حصان الملك في مستنقع. أدرك شارلمان أن مياه الحمأة كانت ساخنة وأن البخار خرج من التربة. أعاد شارلمان اكتشاف الينابيع الساخنة في آخن.

جرى إنشاء المنتجعات الحرارية جنوب شرق أوراديا في ترانسيلفانيا في العصور الوسطى في الينابيع الساخنة لنهر بيتا. كما استخدمت مياه بيتا فيما بعد كسائل تذويب عن طريق توجيهها إلى خندق القلعة حول قلعة أوراديا لمنع المياه من التجمد وللحفاظ على وظيفة الخندق المائي.

في شودز-أغيه Chaudes-Aigues في وسط فرنسا، بدأ بناء أول نظام تدفئة مركزي، لا يزال يعمل حتى الوقت الحالي، في القرن الرابع عشر.

أُعيد اكتشاف معظم المنتجعات الصحية الرومانية القديمة في القرنين الثالث عشر والرابع عشر. ومع ذلك، فإن الطفرة الكبيرة للمنتجعات الحرارية الأوروبية لم تبدأ قبل القرن الثامن عشر. تطورت المنتجعات الصحية إلى أماكن التقاء النبلاء والأرستقراطيين والبرجوازية الصاعدة.

مع أنّ أول نظام تدفئة للمناطق في العالم قد تم تركيبه في Chaudes-Aigues، بفرنسا، في القرن الرابع عشر، إلا أنه لم تبدأ المدن الأخرى، وكذلك الصناعات، في إدراك الإمكانات الاقتصادية لموارد الطاقة الحرارية الأرضية حتى أواخر القرن التاسع عشر.

كتب الراهب سافوناروﻻ Savonarola وعالم التشريح فالوبيو Fallopio الدراسات العلمية الأولى حول الاستخدام العلاجي للمنتجعات الحرارية والتركيب الكيميائي للمياه في القرنين الخامس عشر والسادس عشر.

تعود التقارير الأولى من الصين حول الينابيع الحرارية بما في ذلك الإرشادات العلاجية وأدلة الزراعة إلى القرن الرابع إلى القرن السادس. على سبيل المثال، فإن تحويل المياه الحرارية إلى الحقول من أجل محصول الأرز يسمح بالحصاد الأول بالفعل في مارس ويسمح بثلاثة مواسم في العام. وقد كتب عالم الصيدلة لي شيزهن Li Shizhen أول مراجعة علمية للمياه المعدنية والحرارية في الصين في القرن السادس عشر. في كتابه (خلاصة وافية للمواد الطبية) صنف المياه على أساس المعايير الكيميائية والوراثية.

نشر جورجيوس بيكتوريوس في عام 1560 وصفًا للمنتجعات الصحية في جنوب ألمانيا (Badenfahrtbüchlein) وإرشادات حول كيفية استخدامها. وربما يمثل أول أطروحة للعلاج بالمياه المعدنية. درس جورجيوس بيكتوريوس الطب في جامعة فرايبورغ وصار فيما بعد معروفاً إقليميّاً بمقالاته الطبية.

لقد درس جميع الخبراء ذوي الصلة بالاستحمام العلاجي في العصور القديمة والوسطى. وصف بيكتوريوس في كتابه (Badenfahrtbüchlein) جميع المنتجعات الصحية الكلاسيكية في جنوب غرب ألمانيا التي لا تزال جميعها مستخدمة حالياً واحدة تلو الأخرى.



كما أُبلغ عن تجربة مبكرة مع الظواهر الحرارية الأرضية من صناعة التعدين. فقد أدرك أغريكولا Agricola في عام 1530 بالفعل أن درجة الحرارة في المناجم تحت الأرض تزداد مع العمق.

من المحتمل أن تكون أول قياسات لدرجة الحرارة أُبلغ عنها باستخدام مقياس حرارة هي تلك التي أجراها دي جينسان De Gensanne في عام 1740 في منجم بالقُرّب من بلفور فرنسا. ثم قام ألكساندر فون همبولت بقياس الزيادة في درجة الحرارة بمقدار 3.8 درجة مئوية لكل 100 متر زيادة في العمق في منطقة التعدين في فرايبرغ، ساكسوني، في عام 1791. كان هذا أول تقرير عن مفهوم التدرج الحراري الأرضي Geothermal gradient، وهو عامل أساسي في استغلال الطاقة الحرارية الأرضية. وقد جرى تأكيد وجوده وتنوعه بسرعة من خلال البيانات من أمريكا الوسطى والجنوبية.

في ألمانيا، أجريت قياسات درجة الحرارة في حفر عميقة حتى عمق 1000 متر في السنوات 1831–1863. بعد بضع سنوات، ارتفعت القياسات إلى 1700 متر.

نشأ متوسط زيادة في درجة الحرارة بمقدار 3 درجات مئوية لكل 100 متر من الحجم المتزايد بسرعة للبيانات، الذي يُعرف حالياً باسم التدرج الطبيعي لدرجة الحرارة. وتحقق أول قياس لكثافة تدفق الحرارة السطحية بوساطة بنفيلد Benfield عام 1939.

جرى قياس درجة حرارة عالية بشكل مدهش عند 38.7 درجة مئوية في الحفرة السفلية لحفرة بعمق 342 مترًا في نيوفن في جنوب ألمانيا في عام 1839. وهذا يتوافق مع التدرج الحراري الأرضي البالغ 9 درجات مئوية لكل 100 متر، واكتشف في الفترة نفسها أول شذوذ كبير في درجة الحرارة الأرضية.

• تاريخ استخدام الطاقة الحرارية الأرضية في آخر 150 عامًا

لم يبدأ استخدام المياه الحرارية لتحويل الطاقة قبل النصف الثاني من القرن التاسع عشر فيما يتعلق بالتطور السريع للديناميكا الحرارية. ساعدت الديناميكا الحرارية على تحويل الطاقة بكفاءة من البخار الساخن أولاً إلى طاقة ميكانيكية، ثم إلى طاقة كهربائية بمساعدة التوربينات والمولدات.

يرتبط تطوير توليد الطاقة الحرارية الأرضية بوضوح بمنطقة لارديريللو Larderello في توسكانا في شمال إيطاليا. حتى أوائل القرن التاسع عشر، كانت الينابيع الحرارية بالقُرّب من لارديريلو تُستخدم لإنتاج البورون ومواد أخرى مذابة في المياه الحرارية.

في عام 1827 قام المهندس فرانشيسكو لارديريل، مؤسس صناعة البورون، بتركيب أول محطة لتحويل الطاقة الحرارية الأرضية. غُطيت إحدى بِرك الماء الساخن بقبة من الطوب. كان البناء أول غلاية بخارية منخفضة الضغط يجري تسخينها بشكل طبيعي بالمياه الأرضية. وقد أنتجت الحرارة اللازمة لتبخير المياه الغنية بالبورون لإنتاج البورون بالإضافة إلى المضخات والآلات الأخرى التي تعمل بالطاقة. وقد وفر التثبيت كميات كبيرة من الحطب وأمكن وضع حد لإزالة الغابات في المنطقة. في عام 1904 أُنتجت أول طاقة كهربائية من مصدر للطاقة الحرارية الأرضية عن طريق ربط محرك بخاري بمولد في لارديريلو.





لارداريلو 1904: تُظهر الصورة برينسيبي بييرو جينوري كونتي مع أجهزته التي حولت الطاقة الحرارية الأرضية إلى طاقة كهربائية لأول مرة في التاريخ. كان للتثبيت القدرة على إضاءة المصابيح الكهربائية.

عندما بدأ تشغيل أول محطة لتوليد الطاقة في لارداريلو في عام 1913، كان لديها بالفعل طاقة كهربائية تبلغ 250 كيلو واط. في عام 1915، كانت محطة الطاقة تبلغ 5 ميغاواط (5 MW)، وكانت مدفوعة بالبخار المشبع. من عام 1931 وما بعد، أنتجت الثقوب العميقة الجديدة بخارًا شديد السخونة لمحطة الطاقة الكهربائية بدرجة حرارة 200 درجة مئوية.

لا يحوي البخار شديد السخونة على مكونات تسبب التآكل وتكون القشور على عكس البخار المشبع. لذلك لم يكن تركيب أنظمة المبادلات الحرارية

ضروريّاً . في عام 1939، كان إجمالي الطاقة المركبة لجميع محطات توليد الطاقة في لارداريلو تصل إلى 66 ميغاواط.



في عام 1913، صارت لارديريلو موقعاً لأول محطة تجارية لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية في العالم. بعد الحرب العالمية الثانية، صارت الولايات المتحدة منتجاً رئيسيّاً للطاقة الحرارية الأرضية.

دُمّرت الحقول الحرارية الأرضية الإيطالية في نهاية الحرب العالمية الثانية ولكن أعيد بناؤها بعد الحرب. حالياً يُنتج 545 ميغاواط من الطاقة الكهربائية في مصانع لارداريلو، بنسبة 1.6 % من إجمالي إنتاج الطاقة الكهربائية في إيطاليا (2010).



تنتج حقول لارداريلو الحرارية الأرضية عن تدخلات نارية على مستوى ضحل عند هامش الصفائح المتقاربة للصفائح البوليانية والأوراسية أسفل توسكانا. تنتج التدرجات الحرارية الأرضية العالية جدّاً من حجرات الصهارة الضحلة.

في عام 1890، استخدمت الحرارة الأرضية النظامية في وقت مبكر في بويز، وأيداهو، الولايات المتحدة الأمريكية من خلال استكمال نظام تدفئة المنطقة. واستخدمت معظم المدينة الحرارة الأرضية بحلول عام 1970.

ثم استنسخ هذا النظام في عام 1900 بوساطة كلاماث فولز، أوريغون، الولايات المتحدة الأمريكية. في وقت لاحق، في عام 1926، بدأت كلاماث فولز في استخدام بئر للطاقة الحرارية الأرضية لتدفئة الصوبات الزراعية. وجرى تسخين المنازل الخاصة الأولى بالحرارة الأرضية من آبار منفصلة في شلالات كلاماث في عام 1930.

بدأ استخدام المياه الحرارية لتدفئة المنازل والصوبات الزراعية في ريكيافيك Reykjavik بأيسلندا على نطاق واسع في عشرينيات القرن الماضي. أطلق الفايكنغ اسم ريكيافيك، وهو خليج البخار، بسبب الينابيع الحرارية المتصاعدة بشكل واضح.

حُفرت الآبار الأولى في خزانات الماء الساخن لتدفئة المباني في وقت مبكر في منتصف القرن التاسع عشر. تبع ذلك تدفئة حرارية أرضية للمباني العامة ومناطق المدينة بكاملها.

حالياً، من الواضح أن أيسلندا هي رقم واحد في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية في العالم. حيث توفر 79700 تيرا جول أو 53 % من الطاقة الأولية من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية. توفر الطاقة الحرارية الأرضية والطاقة الكهرومائية 99.9 % من الطلب على الطاقة الكهربائية في البلاد. الحقول الحرارية الأرضية منخفضة المحتوى الحراري بالقُرْب من ريكيافيك تزود المياه بدرجات حرارة تصل إلى 150 درجة مئوية التي يمكن استخدامها في أنظمة التدفئة المنزلية.

يعيش أكثر من نصف سكان أيسلندا في المنطقة. توفر الحقول الحرارية الأرضية التدفئة والمياه الساخنة لـ 90 % من الأسر الأيسلندية. تقع الحقول عالية المحتوى الحراري على طول الحزام البركاني النشط الذي يعبر الجزيرة. درجات الحرارة النموذجية هي 200 درجة مئوية، ولكن هذه المياه عالية المعادن وغنية بالغاز ولا يمكن استخدامها مباشرة.

تنتج محطات الطاقة المتنوعة عادة نحو 10 ميغاواط من الطاقة الكهربائية في التوربينات البخارية. تعتبر محطة نيسجافيلر Nesjavellir في جنوب غرب أيسلندا أكبر محطة للطاقة الكهربائية في الجزيرة. تنتج نحو 120 ميغاواط من الطاقة. يستخدم الحرارة البركانية لبركان هينغيل المركزي، وكذلك الحرارة من الينابيع والآبار المحفورة. تعمل المياه الحرارية لأيسلندا في العديد من فروع الصناعة المختلفة.





محطة نيسجافيلر لتوليد الطاقة في أيسلندا؛ 120 ميغاواط من الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى 380 ميغاواط من الطاقة الحرارية من 83 درجة مئوية من المياه في 2010، ودرجات حرارة الخزان تصل إلى 380 درجة مئوية.

بعد التطور في إيطاليا وأيسلندا، أقامت نيوزيلندا في عام 1958 أول محطة للطاقة الحرارية الأرضية في واياراكي Wairakei؛ وفي عام 1959، بدأت منشأة تجريبية في باتي بالمكسيك، وفي عام 1960، بدأ شمال كاليفورنيا مشروع The Geysers. حالياً، تتكون الفوارات الحارة من 21 محطة طاقة بسعة إجمالية تبلغ 750 ميغاواط من الطاقة الكهربائية. إنها واحدة من أكبر منشآت للطاقة الحرارية الأرضية في العالم. تكفي الكهرباء المنتجة لتزويد مدينة بحجم سان فرانسيسكو.

ومع ذلك، حدثت انتكاسات شديدة أيضاً. تخضع ربحية إنتاج الطاقة الحرارية الأرضية للظروف الاقتصادية العامة، مثل الطلب والعرض وسعر أنواع الطاقات الأخرى مثل النفط الخام. قد يؤدي تغيير القوانين واللوائح البيئية إلى زيادة الجهود والتكاليف.

اليونان والأرجنتين -على سبيل المثال- أغلقت منشآت الطاقة الحرارية الأرضية القائمة لأسباب بيئية واقتصادية. وحُفرت الآبار العميقة في ألمانيا لمنشآت الطاقة الحرارية الأرضية في الثمانينيات من القرن الماضي بعد ارتفاع أسعار النفط والغاز. وقد تعود أوروبا بكاملها حالياً لهذا المصدر المتجدد بعد أزمة حرب أوكرانيا.

توقف التطوير الإضافي لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية العميقة خلال الأزمة الاقتصادية والانهيار المرتبط بأسعار النفط. يأتي استئناف مشروعات الطاقة الحرارية الأرضية في أعقاب ارتفاع سعر موارد الوقود الأحفوري.

في عام 2003، بدأ أول إنتاج للطاقة الكهربائية من مصدر حراري أرضي في ألمانيا في نويشتادت-غليفيه Neustadt-Glewe . وفي عام 2007 آبار لانداو الحرارية الأرضية و2009 آبار بروكسال التي جرى حفرها في ثمانينيات القرن الماضي بدأت بالفعل في إنتاج الطاقة الكهربائية.

جرى الانتهاء من أول حفر موثق لأنظمة المضخات الحرارية الأرضية في وسط أوروبا في أواخر صيف عام 1974 في شونيش، جنوب ألمانيا.

لتعديل مبنى قائم (من عام 1965) بمضخة حرارية أرضية مثل نظام التدفئة الحصري، جرى تركيب خمس حلقات أرضية بعمق 50 - 55 مترًا بمسافة 4 - 5 أمتار بين فتحات الآبار مرتبة في مجموعة خطية من خمسة مجسات متحدة المحور مع أنابيب فولاذية سميكة الجدران (60 × 5 ملم) وخرطوم بلاستيكي محوري.

جرى تحميل المجسات بمزيج من الماء والغليكول. لم يُنفّذ حشو الحلقة باستخدام التعليق الأسمنتي البنتونيت، وهو إجراء قياسي حالياً.

كانت درجات حرارة إمداد المياه في المجسات من -3 إلى -4 درجة مئوية لفترات تحميل الذروة (درجات حرارة خارجية مستمرة من -15 إلى -20 درجة مئوية خلال عدة أسابيع)؛ كانت درجة حرارة العودة نحو +1 درجة مئوية. وقد بقي النظام قيد التشغيل لمدة 30 عاماً. لكن فشل أحد التحقيقات في عام 2005 على الأرجح بسبب التلف الناتج عن التآكل. يعمل النظام حالياً بأربعة مجسات وغلاية تعمل بالزيت.

في عام 1852، اخترع اللورد كلفن المضخة الحرارية، وهي قطعة مُهمَّة من المعدات لاستخدام الطاقة الحرارية الأرضية القريبة من السطح. قدم هاينريش زولي طلب براءة اختراع في عام 1912 لاستخدام مضخة حرارية لاستخراج الحرارة من باطن الأرض. لم يحدث أول تنفيذ ناجح لنظام المضخات الحرارية الأرضية قبل أربعينيات القرن العشرين.

هذه المضخات الحرارية ذات المصدر الأرضي الأولي (GSHP) في إنديانابوليس وفيلادلفيا وتورنتو فيها مجمعات أرضية وضعها بالقُرْب من السطح. استخدم التركيب التجريبي لشركة Union Electric في سانت لويس الأنابيب الحلزونية في فتحات حفر عميقة من 5 إلى 7 أمتار كمبادلات حرارية.

استخدمت أنظمة أخرى مبكرة مثل المبنى الإداري في زيورخ 1938 والمبنى العدلي في بورتلاند في عام 1948 مياه الأنهار أو المياه الأرضية كمصدر للحرارة، ومن ثم فهي لا تستخدم الطاقة الحرارية الأرضية بالمعنى الدقيق للكلمة.

بحلول عام 2015، كانت أكثر من 80 دولة تستخدم الطاقة الحرارية الأرضية، إما بشكل مباشر أو بالاشتراك مع أنظمة GHPs، وكان الرواد، هم: الصين، وتركيا، وأيسلندا، واليابان، والمجر، والولايات المتحدة.

بلغ إجمالي القدرة المركبة في جميع أنحاء العالم للاستخدام المباشر في عام 2015 نحو 73290 ميغاواط حرارياً باستخدام نحو 163273 غيغاواط / ساعة سنوياً (587786 تيراجول سنوياً)، مما ينتج عنه عامل استخدام سنوي - الطاقة السنوية التي تنتجها المحطة (بالميغاواط- ساعة) مقسومة على السعة المركبة للمحطة (بالميغاواط [MW]) مضروبة في 8760 ساعة - بنسبة 28 % في وضع التسخين.

جرى استخدام الطاقة الحرارية الأرضية لإنتاج الكهرباء في 24 دولة في أوائل القرن الحادي والعشرين، وكان القادة هم الولايات المتحدة والفلبين وإندونيسيا والمكسيك ونيوزيلندا وإيطاليا.

في عام 2016، بلغ إجمالي السعة المركبة في جميع أنحاء العالم لتوليد الطاقة الكهربائية نحو 13400 ميغاواط، مما أدى إلى إنتاج نحو 75000 غيغاواط / ساعة سنوياً لعامل استخدام بنسبة 71 % (أي ما يعادل 6220 ساعة تشغيل بالحمل الكامل سنوياً).

تمتلك العديد من مجالات الطاقة الحرارية الأرضية عوامل استخدام تبلغ نحو 95 % (ما يعادل 8322 ساعة تشغيل بالحمل الكامل سنوياً)، وهي أعلى نسبة لأي شكل من أشكال الطاقة المتجددة.

غالباً ما يتم استخدام مائع النفايات من محطة توليد الكهرباء في التطبيقات ذات درجات الحرارة المنخفضة، مثل الدورة السفلية في محطة الدورة الثنائية، قبل إعادة حقنه في الخزان. يمكن العثور على مثل هذه الاستخدامات المتتالية في الولايات المتحدة وأيسلندا وألمانيا.

المجال الحــراري للأرض والخصائــص الحراريــة للصخــور

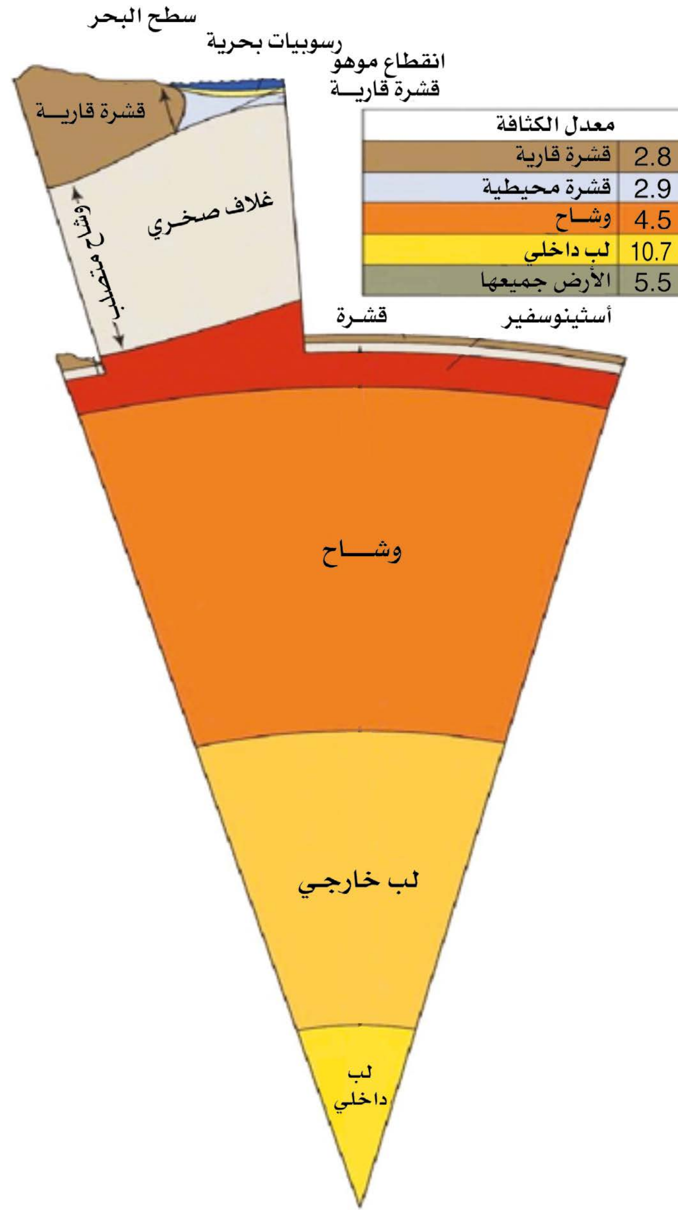
يعتقـد العلمـاء أن الاسـتفادة مـن الطاقـة الحراريـة الأرضيـة سـيكون حـلاًّ مسـتداماً لتقليـل آثـار الاحتبـاس الحـراري والاعتمـاد علـى الوقـود الأحفـوري. تختـزن الأرض في جوفها كميـات هائلـة مـن الطاقـة الحراريـة ومـن المتعـارف عليـه أن درجـة حـرارة الكـرة الأرضيـة ترتفـع كل مـا انتقلنـا إلـى الأسـفل حيـث تتـراوح درجـة الحـرارة في أعمـاق القشـرة الأرضيـة مابـين 500 - 1000 درجـة مئويـة وتصـل إلـى 2500 درجـة مئويـة في درجـة الوشـاح أمـا طبقـة اللـب الخارجـي تبلـغ درجـة حرارتهـا حوالـي 3900 درجـة مئويـة يليهـا طبقـة اللـب الداخلـي والتـي تصـل حرارتهـا إلـى 6000 درجـة مئويـة وفيمـا يلـي نوضـح البنيـة الداخليـة لـلأرض والخصائـص الحراريـة للصخـور.

تتكوّن البنية الداخلية للأرض من ثلاثة أجزاء رئيسية، وهي:

- القشـرة الأرضيـة (Crust) وتمثّل الطبقـة التـي نعيـش عليهـا وتحتـوي علـى الغـلاف الصخـري لـلأرض. وتنقسـم القشـرة إلـى قشـرة قاريـة تتكـون مـن صخـور فلسـية (Felsic Rocks) ويتـراوح سـمكها مـن 5-70 كـم، وقشـرة محيطيـة تتكـوّن مـن صخـور مافيـة (Mafic Rocks) ويتـراوح سـمكها مـن 5-6 كـم.
- الوشـاح (Mantle): يقـع أسـفل القشـرة الأرضيـة ويعـد الجـزء الأكثـر سـماكة مـن الأرض حيـث يصـل سـمكه إلـى 2900 كـم ويشـكّل مـا يقـارب 85 % مـن حجـم الأرض. ويتميـز الجـزء الخارجـي منـه بأنـه لـزج بينمـا يكـون الجـزء الداخلـي صلبـا.
- اللّـب (Core): يقـع اللّـب تحـت الوشـاح ويتكـوّن مـن طبقتـين؛ طبقـة خارجيـة سـائلة (النـواة الخارجيـة) مـن الحديـد والنيـكل تحيـط باللّـب الداخلـي الصلـب



لـلأرض (النـواة الداخليـة). وتصـل درجـة الحـرارة في لـبّ الأرض إلـى 6000 درجـة مئويـة، والضغـط إلـى مـا يقـارب 360000 ميغـا بـار.



البنية الداخلية للأرض

وتدل العديد من الظواهر الطبيعية على وجود درجات حرارة مرتفعة في باطن الأرض؛ ومن تلك الظواهر البراكين التي يصاحبها اندفاع الحمم المنصهرة ذات الحرارة العالية، وينابيع المياه الحارة والفوّارات. كما يمكن أن يستشعر هذه الحرارة العاملون في المناجم، وتلاحظ كذلك في عمليات حفر الآبار العميقة لأغراض التنقيب عن النفط.

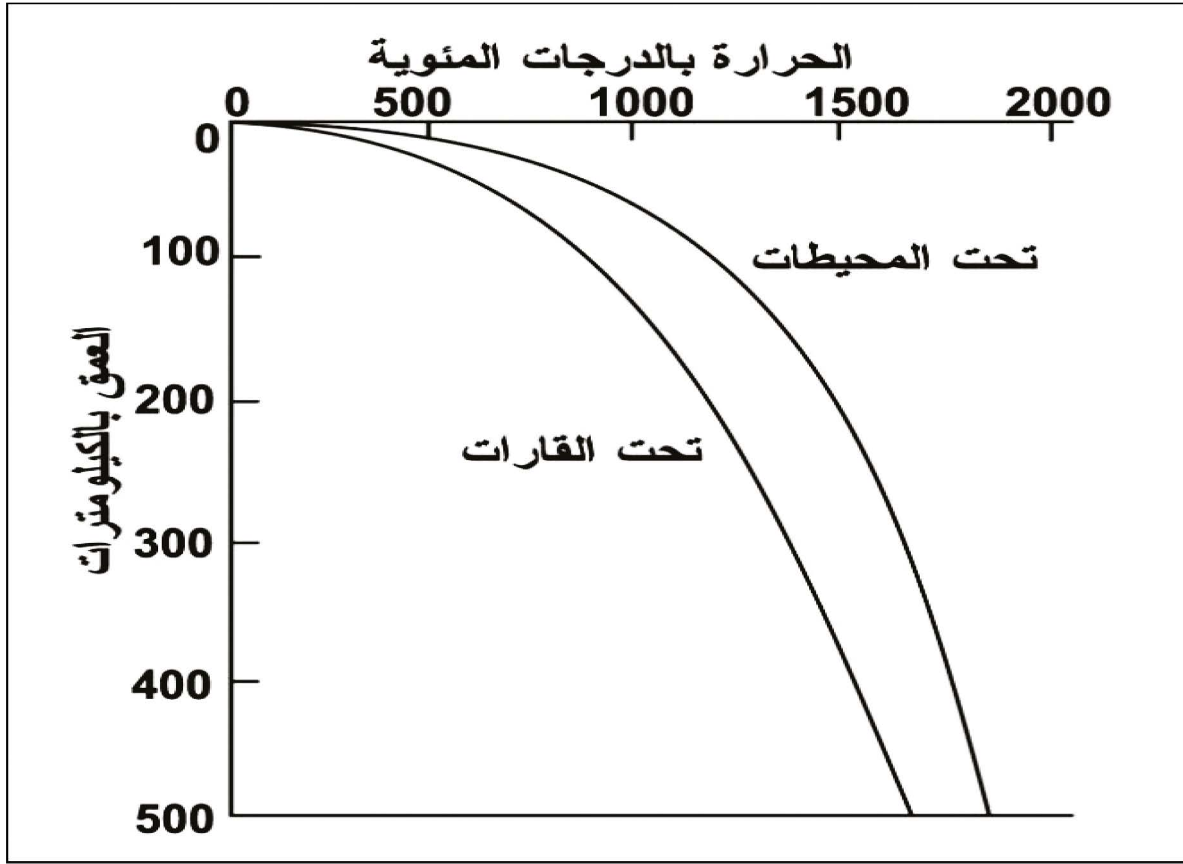
وتقدّر كمية الحرارة المختزنة في جوف الأرض بما يقارب 12.6×10^{24} ميجا جول، وهذه الكمية الهائلة تجعل من الطاقة الحرارية الأرضية مصدرا من مصادر الطاقة المتجددة. وترتبط حرارة جوف الأرض بعدة مصادر لها؛ فقد اكتسبت الأرض هذه الحرارة أثناء نشأتها ضمن النظام الشمسي وتشكّل ما نسبته 30 % من حرارة الأرض المختزنة. ويضاف إلى ذلك، الحرارة المكتسبة من اضمحلال العناصر المشعة طبيعيا كاليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم والتي تنتشر في تركيب القشرة الأرضية وفي الجزء العلوي من الوشاح. وتشكّل هذه الحرارة ما يقارب 70 % من الحرارة الكلية المختزنة في جوف الأرض.

كمية الحرارة الناتجة من اضمحلال العناصر المشعة طبيعيا.

النظير	الحرارة الناتجة (واط/كيلوجرام) للنظير	عمر النصف (سنوات)	معدّل التركيز في الوشاح (كجم نظائر/كيلوجرام) من الوشاح	الحرارة الناتجة (واط/كيلوجرام من الوشاح)
U^{238}	9.46×10^{-5}	4.47×10^{9}	30.8×10^{-9}	2.91×10^{-12}
U^{235}	5.69×10^{-4}	7.04×10^{8}	0.22×10^{-9}	1.25×10^{-13}
Th^{232}	2.64×10^{-5}	1.40×10^{10}	124×10^{-9}	3.27×10^{-12}
K^{40}	2.92×10^{-5}	1.25×10^{9}	36.9×10^{-9}	1.08×10^{-12}

بيِّنت الدراسات الجيولوجية أن درجة الحرارة للقشرة الأرضية تزداد كلما انتقلنا نحو الأسفل وبمعدل يبلغ ثلاث درجات مئوية لكل مائة متر تقريباً، حسب قياسات كثيرة أجريت في عدد من المناطق على سطح الأرض. إلا أنه في المناطق الزلزالية والبركانية فإن ازدياد معدلات درجات الحرارة في القشرة الأرضية يكون بدرجة أكبر. أما أسباب ارتفاع درجة الحرارة لطبقات الأرض، فيعزى إلى عدة أسباب، فلب الأرض منصهر يحتوي على كثير من الطاقة الحرارية التي تتدفق نحو الطبقات الأعلى. كما أن قوى الجاذبية واحتكاك طبقات الأرض ببعضها بعضاً ينتج عنه ارتفاع كبير في درجة حرارة تلك الصخور والمياه الموجودة فيها. كذلك فإن تحلل المواد المشعة الموجودة في باطن الأرض يتسبب في ارتفاع درجة حرارة جوف الأرض، كانحلال الراديوم واليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم وغيرها من العناصر ذات النشاط الإشعاعي. وهذا ما يجعل جانباً كبيراً من الطاقة الحرارية للأرض يتجدد بفعل النشاط الإشعاعي الطبيعي وقوة الجاذبية والاحتكاك. عموما ترتفع درجة حرارة القشرة مع العمق بسبب تدفق الحرارة من الوشاح الأكثر سخونة؛ بعيدًا عن حدود الصفائح التكتونية، ترتفع درجة الحرارة بحوالي 25 - 30 درجة مئوية / كم من العمق بالقرب من السطح في معظم أنحاء العالم وهذا ما يعرف بالتدرج الحراري الأرضي (Geothermal Gradient). التدرج الحراري تحت اليابسة وتحت المحيطات. ومع ذلك، في بعض الحالات ، قد تنخفض درجة الحرارة مع زيادة العمق، خاصة بالقرب من السطح ، وهي ظاهرة تُعرف بالتدرج الحراري الأرضي العكسي أو السلبي.





التدرج الحراري في باطن الأرض.

ويؤّدي ازدياد درجة حرارة باطن الأرض مع العمق إلى وصول الصخور إلى درجة الانصهار عند أعماق قليلة نسبياً، وتصبح درجات حرارتها عند أعماق أكبر أعلى بكثير من درجات انصهارها. إلا إن خضوعها لضغط كبير جدا يحافظ على هذه الصخور في حالة صلبة. وتبدأ الصخور بالانصهار الجزئي عند انخفاض الضغط عليها؛ مثلا عند اقترابها من سطح الأرض أو عند حدوث صدوع عميقة.



ونتيجة لوجود فرق في درجة الحرارة بين المناطق العميقة للأرض، ذات الحرارة المرتفعة، والمناطق الأقل عمقا، ذات الحرارة الأقل، تنشأ تيارات حرارية تنتقل من مركز الأرض باتجاه قشرتها؛ وهو ما يعرف بالتدفق الحراري (Heat Flow). وتنتقل الحرارة الأرضية من منطقة إلى أخرى في باطن الأرض بطريقتين رئيسيتين:

1. التوصيل الحراري بواسطة الصخور.
2. النقل بواسطة حركة الموائع مثل المياه الجوفية والغازات (Advection).

تم تقدير التدفق الكلي للحرارة من الأرض (التوصيل ، الحمل الحراري والإشعاع) إلى الغلاف الجوي ب 42×10^{12} واط، يأتي من القشرة 8×10^{12} وات، والتي تمثل 2 % من حجم الارض. يأتي 32.3×10^{12} واط من الوشاح، والتي تمثل 82% من إجمالي حجم الأرض و 1.7×10^{12} وات تأتي من النواة والتي تمثل 16% من حجم الأرض. أما معدل تبريد الأرض تقريبا هو 10.3×10^{12} واط.

يمكن حساب التدفق الحراري، q، بطريقة التوصيل باستخدام قانون فوريير (معادلة 1)؛ وينص القانون على تناسب التدفق الحراري (واط لكل وحدة مساحة خطيا مع التدرج الحراري، ΔT، بين مناطق مختلفة من النظام الجيولوجي، مع ثابت تناسب تمثله الموصلية الحرارية للصخر، λ (جول / ثانية. متر. كلفن).

$$q = -\lambda \Delta T$$

وتعبّر الموصلية الحرارية، λ، عن قدرة الصخور على توصيل الحرارة، وتتفاوت قيمها بمقدار كبير بين أنواع الصخور المختلفة. فالموصلية الحرارية لصخور القاعدة المتبلورة مثل صخور الجرانيت والنايس تزيد بمقدار 2-3 مرات على

الموصلية الحرارية للرسوبيات غير المتماسكة مثل الرمل والحصى. كما تتفاوت الموصلية الحرارية للصخر الواحد نتيجة التغيّر في تركيب الصخر واختلاف درجات تماسك حبيباته وتباين خواصه (Anisotropy).

الموصلية الحرارية والحرارة النوعية لبعض أنواع الصخور.

الصخر	الموصلية الحرارية (جول/ثانية. متر. كلفن)	الحرارة النوعية (كيلو جول/كغم.كلفن)
رمل جاف	0.3 – 0.8	0.50 – 0.59
رمل رطب	1.7 – 5.0	0.85 – 1.90
الحجر الجيري	2.5 – 4.0	0.80 – 1.00
الدولومايت	1.6 – 5.5	0.92 – 1.06
الحجر الرملي	1.3 – 5.1	0.82 – 1.00
الجرانيت	2.1 – 4.1	0.75 – 1.22
النايس	1.9 – 4.0	0.75 – 0.90
البازلت	1.3 – 2.3	0.72 – 1.00

يعتبر الغلاف الصخري للقشرة الأرضية موصلا حراريا، حيث تتفاوت موصليته الحرارية نتيجة وجود غلاف صخري قاري وآخر محيطي للقشرة. وتنشأ القشرة المحيطية عند مراكز توسع حيد منتصف المحيط (Mid-Ocean Ridge) بفعل اندفاع صخور الوشاح المنصهرة. ثم تبرد القشرة المحيطية بعد ذلك وتصبح أكثر كثافة وتعود للوشاح. وعلى خلاف ذلك، فإن القشرة القارية لا تعود للوشاح نظرا لانخفاض كثافة مكوناتها حتى بعد أن تبرد.

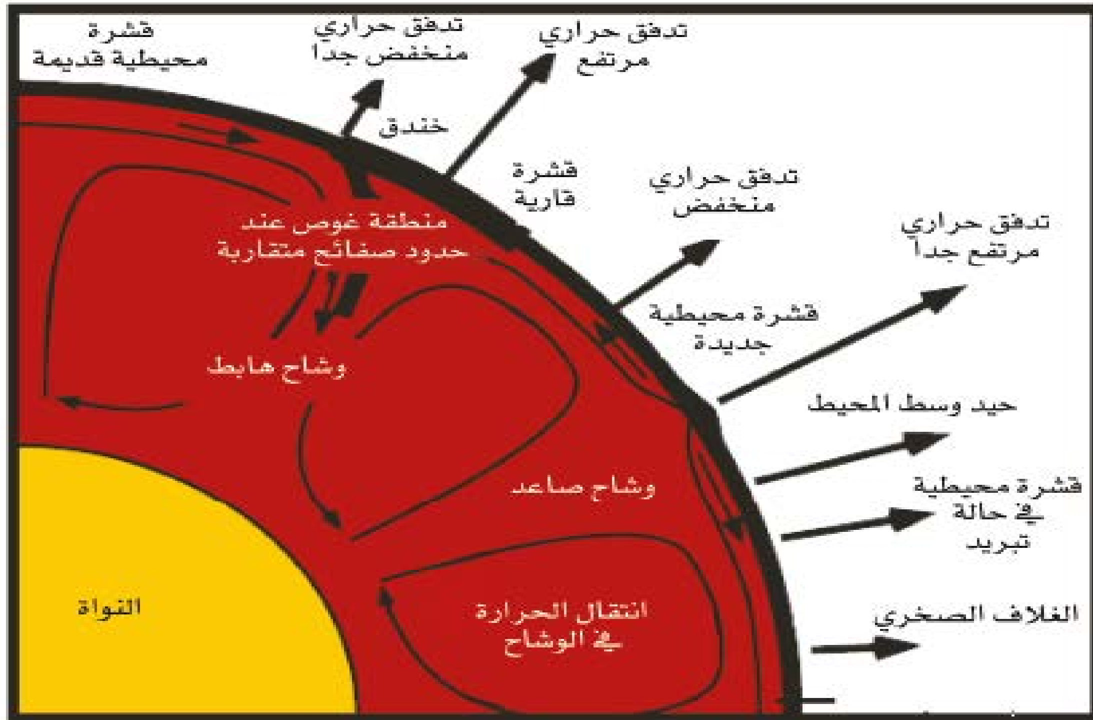
ويستنتج مما تقدّم أن التوزيع المكاني للحرارة السطحية للأرض ناتج بشكل أساسي عن عمليات الحمل الحراري التي تتم في الوشاح، والعمليات المرتبطة بتكتونية الصفائح. ويبلغ متوسط التدفق الحراري في المناطق القارية 65 مللي واط/م^2، في حين تصل قيمتها في المناطق المحيطية إلى 101 واط/م^2 وبمعدل 87 واط/م^2. كما تسجّل قيما محلية للتدفق الحراري تصل إلى مئات أو آلاف المللي واط للمتر المربع (مثل منطقة لارداريللو في إيطاليا).

• جيولوجية خزان الحرارة الجوفي الأرضي

تنقسم القشرة الأرضية إلى حوالي عشرين صفيحة تكتونية تطفو فوق الصهارة في منطقة الوشاح، وفقا لنظرية الصفائح التكتونية. ويرتبط توزيع مناطق الطاقة الحرارية الأرضية حول العالم ارتباطا وثيقا بالصفائح التكتونية؛ حيث تتواجد مصادر الطاقة الحرارية الأرضية ذات درجات الحرارة العالية عند أطراف هذه الصفائح ومن أشهرها المنطقة التي تعرف بـ «حلقة النار أو الحزام الناري».

ويتسبب تكسر الصفائح التكتونية بحدوث انفتاح في القشرة الأرضية تصعد منه الصهارة من الوشاح مقتربة من السطح (مثال ذلك الانفتاح الحاصل في البحر الأحمر). أما في حالات التصادم بين الصفائح التكتونية، فتتشكل أقواس الجزر مثل الأرخبيل الياباني في حالة تصادم صفائح محيطية، بينما تتكوّن الجبال في حالة وجود صفيحة محيطية وأخرى قارية مثل جبال الأنديز. كذلك تتكوّن سلاسل جبلية مثل جبال الألب وجبال الهيمالايا إذا كانت الصفائح المتصادمة قارية.





تعمل تيارات الحمل الحراري في طبقة الوشاح اللزجة على تحريك الصفائح التكتونية وتتحكّم بتوزيع التدفق الحراري الأرضي

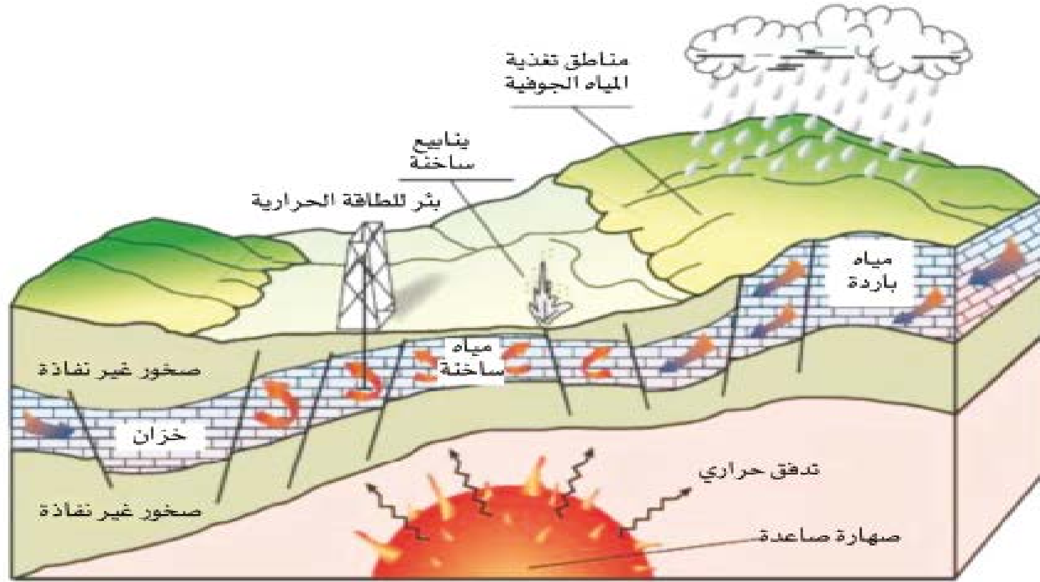
يتكوّن نظام تخزين الحرارة الجوفية الأرضية من ثلاثة مكونات رئيسية:

- مصدر حراري: قد يكون مصدر الحرارة صهارة (ماغما) صاعدة ذات درجة حرارة تزيد على 600 درجة مئوية تصل لعمق قريب نسبيا (من 5 - 10 كم). كما يمكن أن يكون المصدر الحراري حرارة الأرض القريبة من السطح وهي منخفضة نسبيا.

- صخور ساخنة ذات نفاذية عالية تسمح للمياه بالحركة عبرها لنقل الحرارة. وتكون صخور الخزّان مغلفة بصخور غير نفّاذة ومتصلة بمناطق سطحية تعمل على إعادة شحن الخزان بالمياه بطريقة طبيعية لتعويض الفاقد منها.



- سائل لنقل الحرارة: تمثّل المياه في معظم الحالات السائل الحراري في خزّان المياه الجوفية وتكون في الحالة السائلة أو الغازية، وفقا لدرجة حرارتها ومقدار الضغط الخاضعة له. وقد يصاحب حركة المياه الناقلة للحرارة انتقال مواد كيميائية وغازات مثل ثاني أكسيد الكربون (CO_2) وكبريتيد الهيدروجين (H_2S) وغيرها.



مكونات نظام خزّان الحرارة الجوفية الأرضية.

• أنــواع خزانــات الحــرارة الجوفيــة الأرضيــة

تصنّف خزانات الحرارة الجوفية الأرضية من حيث درجة حرارتها إلى ثلاثة أصناف: (1) ذات الحرارة المنخفضة والتي تقل درجة الحرارة لها عن 100 درجة مئوية، و (2) ذات الحرارة المتوسطة من 100 - 150 درجة مئوي، و (3) ذات الحرارة المرتفعة والتي تزيد حرارتها عن 150 درجة مئوية. كما تصنّف حسب حالة الماء (سائل أم بخار) فيها إلى ثلاثة أنواع، وهي: خزانات المياه الدافئة التي تقل حرارتها عن 100 درجة مئوية؛ خزانات المياه الحارة التي تكون فيها المياه في الحالة السائلة ودرجة حرارتها تتراوح بين 100-250 درجة مئوية؛ وخزانات البخار التي يكون فيها الماء في الحالة الغازية.

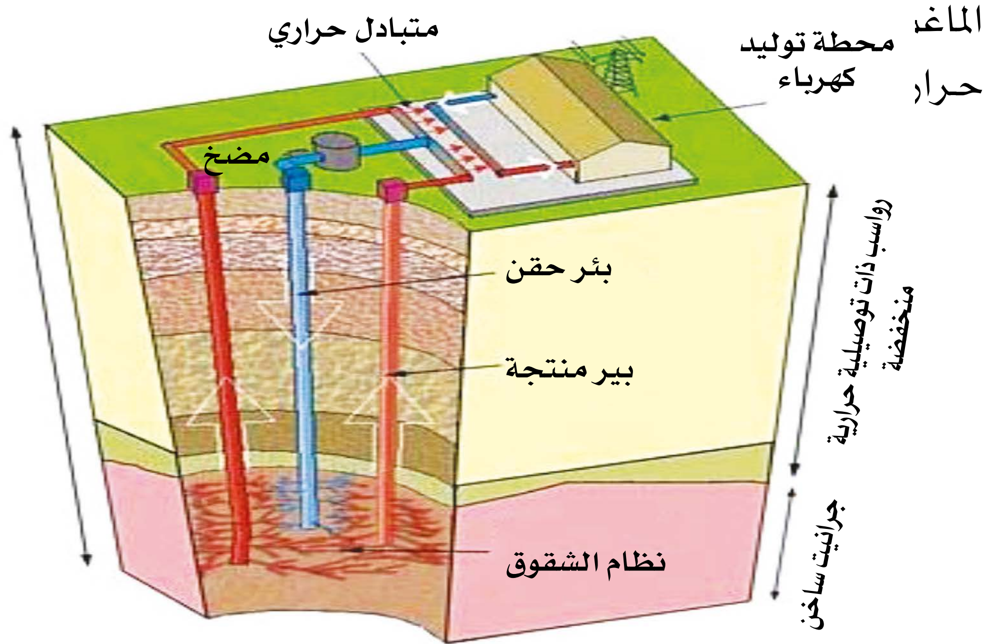
وتصنّف الخزانات الحرارية إلى ثلاثة أنواع وفقا لنوع المصدر الحراري فيها؛ وهي:

- الخزّان الحرمائي (Hydrothermal): يحتوي الخزان الحرمائي على مياه و/أو بخار داخل صخور مسامية أو متشققة يعلوها طبقة صخرية غير نفّاذة. يمكن استغلال الطاقة الحرارية لهذا الخزان في استخدامات مباشرة مثل أغراض تدفئة المباني والبيوت الزجاجية، كما يمكن استخدامها لإنتاج الطاقة الكهربائية ويشترط لذلك أن تزيد درجة حرارة المياه عن 130 درجة مئوية.

- الخزّان المضغوط: يتكون من طبقة صخرية نفاذة حاملة لمياه مالحة وتقع تحت ضغط كبير، وتكون درجة حرارته متوسطة. كما يحتوي على تركيزات كبيرة من المعادن الذائبة وغاز الميثان. ويمكن استغلال هذه المعادن اقتصاديا في عملية مصاحبة لاستغلال الطاقة الحرارة الكامنة فيه.

- خزّان الصخور الساخنة الجافة: يتكون من صخور ساخنة وجافة غير نفاذة ويتواجد على أعماق يمكن الوصول إليها (أقل من 3 كم). وللتمكن من استغلال الطاقة الحرارية التي تمتلكها هذه الصخور، يجب أن تكون الصخور الساخنة مكسرة، وأن يتوفر مصدر مياه دوراني للضخ في الخزان. ويتم تسخين المياه بالتوصيل عند مرورها في شقوق الصخر لتصبح سوائل حرمائية. وتعرف هذه التقنية التي تستغل الطاقة الحرارية للصخور الساخنة الجافة بنظام الطاقة الحرارية الأرضية المحسّن (Enhanced Geothermal System; EGS).

- الماغما: صخور مصهورة جزئيا وهي المصدر الأكبر للحرارة الأرضية وتوجد على أعماق تتراوح بين 3-10 كم. ونظرا للعمق الكبير الذي تتواجد فيه الماغ... درجة حرار...



نظام الطاقة الحرارية الأرضية المحسّن (EGS) لإنتاج الطاقة الكهربائية من خزّان الصخور الساخنة الجافة.

الطرائق الجيوفيزيائية المستخدمة في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية

تعد الطرائق الجيوفيزيائية أحد التخصصات الثلاثة الرئيسية المطبقة على سطح الأرض لاستكشاف موارد الطاقة الحرارية الأرضية، بما في ذلك أيضاً الجيولوجيا وكيمياء الموائع الحرارية. تهدف أكثر الطرائق نجاحاً إلى الخواص (البارامترات) التي تتأثر بشكل مباشر بالنشاط الحراري الأرضي، مثل طرائق المقاومة والطرائق الحرارية، وعادة ما يشار إليها بالطرائق المباشرة. كما تستكشف الطرائق الأخرى المعالم الفيزيائية للصخور المضيفة، بما في ذلك الخصائص المغناطيسية والكثافة والسرعة الزلزالية، وعادة ما يشار إليها بالطرائق غير المباشرة أو الهيكلية.

سنقدم فيما يأتي وصفاً موجزاً لأهم هذه الطرائق ونناقش قوتها وحدودها وأمثلة على استخدامها.

• الطـــرائق الحراريـــة

تشمل الطرائق الحرارية القياسات المباشرة لدرجة الحرارة و / أو الحرارة، ومن ثم فهي ترتبط بشكل أفضل بخصائص نظام الطاقة الحرارية الأرضية أكثر من الطرائق الأخرى. ومع ذلك، كطريقة (قريبة) من السطح، فإنها تقتصر على المستويات الضحلة.

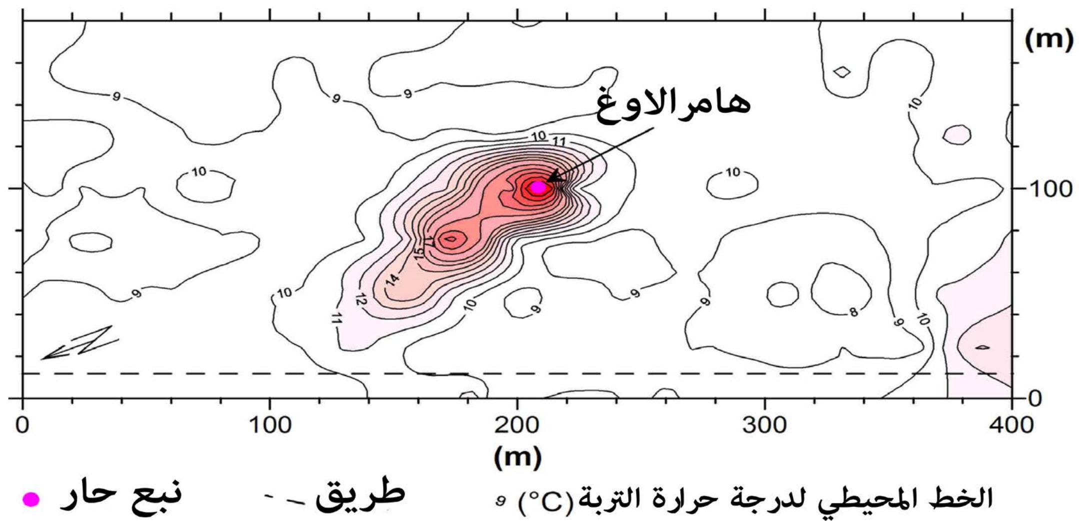
إن قياس درجات الحرارة بالقُرب من السطح، في أول متر أو نحو ذلك، أمر بسيط إلى حد ما. تعتمد المعرفة حول الحالة في المستويات الأعمق على وجود الآبار، التي عادة ما تكون آبار متدرجة ضحلة (على سبيل المثال 30–100 متر عمق)، والتي يمكن من خلالها حساب التدرج الحراري وربما العمق إلى مورد الطاقة الحرارية الأرضية القابل للاستغلال.



مع أن الحفر عادة ما يكون مكلفًا إلى حد ما، ويضع حدودًا عملية لاستخدام الطريقة. علاوة على ذلك، فإن الآبار الضحلة ليست دائماً كافية للحصول على قيم موثوقة على التدرج الحراري.

تعتبر آلية التبادل الحراري في الأرض مُهمَّة لتفسير الطرائق الحرارية. ويجري التمييز بين:

- ✓ التوصيل الذي يعتمد على الاهتزازات الذرية، وهو مُهمٌّ لنقل الحرارة في القشرة الأرضية.
- ✓ والحمل الحراري الذي ينقل الحرارة بحركة الكتلة، على سبيل المثال الدورة الطبيعية للماء الساخن.



قياسات درجة حرارة التربة على عمق 0.5 متر في أسغاردور Asgardur غرب أيسلندا، حيث تكشف ملامح درجة الحرارة عن توزيع خطي، يُعتقد أنه ناتج عن صدع.

• الطرائــــق الكهربائيــــة

تعتبر الطرائق الكهربائية أو طرائق المقاومة من أهم الطرائق الجيوفيزيائية في الاستكشاف السطحي لمناطق الطاقة الحرارية الأرضية، وعلى هذا النحو الطرائق الرئيسية المستخدمة في تحديد موارد الطاقة الحرارية الأرضية ومجالات الإنتاج.

المعلم الأكثر الأهمية هي المقاومة الكهربائية للصخور التي ترتبط بكل من درجة الحرارة وتغيير الصخور التي تعد معالم رئيسية لفهم أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

المبدأ الرئيسي هو أن التيار الكهربائي يجري تحريضه في الأرض الذي يولد إشارة كهرومغناطيسية تراقب على السطح.

يدعى مقلوب المقاومة هو الموصلية أو (الناقلية Conductivity)، ومن ثم من الممكن أيضاً التحدث عن قياسات الموصلية. ومع ذلك، في الطاقة الحرارية الأرضية، فإن التقليد هو الإشارة إلى القياسات الكهربائية أو المقاومة.

تتضمن الطرائق الكهربائية أنواعاً مختلفة من القياسات وإعدادات مختلفة للأنواع المختلفة. أهم الأنواع هي:

1. طريقة التيار المستمر، حيث يُولّد التيار ويحقن في الأرض من خلال أقطاب كهربائية على السطح. الإشارة المقاسة هي الحقل الكهربائي المتولد على السطح.

2. طريقة TEM، حيث يجري تحفيز التيار بوساطة مجال مغناطيسي متغير بمرور الوقت من مصدر متحكم فيه. الإشارة المراقبة هي الحقل المغناطيسي المتحلل على السطح من الحقل المغناطيسي الثانوي.



3. طريقة MT، حيث يحفز التيار من خلال التغيرات الزمنية في المجال المغناطيسي للأرض. الإشارة المقاسة هي الحقل الكهرومغناطيسي على السطح.

1. قياس مقاومة الصخور الكهربائية

المقاومة الكهربائية للصخور في محيط منطقة الطاقة الحرارية الأرضية معلم يعكس خصائص نظام الطاقة الحرارية الأرضية أو تاريخها. ومن ثم، فإن المعرفة الجيدة بالمقاومة ذات قيمة كبيرة لفهم نظام الطاقة الحرارية الأرضية.

يتعلق هذا بحقيقة أن مقاومة الصخور يتم التحكم فيها بشكل أساسي بواسطة معايير مرتبطة بالنشاط الحراري الأرضي، مثل:

✓ المسامية وهيكل المسام، حيث يجري التمييز بين:

- المسامية بين الحبيبات مثل الصخور الرسوبية.

- مسامية الكسر، المتعلقة بالتوتر أو التكسير أو تبريد الصخور النارية.

- المسامية المتعرجة التي تتعلق بإذابة المواد (الحجر الجيري) أو محتوى الغاز (في الصهارة البركانية).

✓ تغيير الصخور، تبطن جدران المسام، غالباً ما يرتبط بالتفاعل بين الماء والصخور.

✓ ملوحة السائل في المسام.

✓ درجة الحرارة.



✓ كمية الماء، أي محتوى التشبع أو البخار.

✓ الضغط.

تعتبر العناصر الأربعة المدرجة أولاً، وهي الصدع (الثانوي) المسامية، والتغيير، وملوحة السائل، ودرجة الحرارة، أهم العوامل، والمعايير الأساسية لنظام الطاقة الحرارية الأرضية. وهذا يفسر سبب أهمية معامل مقاومة الصخور في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، وبخاصة في المناطق البركانية المحيطة، ومن ثم الدور المهم لسبر المقاومة.

2. قياسات التيار المستمر

قياسات التيار المستمر هي أقدم طرائق المقاومة، على الأقل كطرائق مستخدمة لاستكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، وكانت الطرائق الروتينية في الخمسينيات والثمانينيات من القرن الماضي، لكن تطبيقها ليس شائعاً في الوقت الحاضر.

تعتمد معظم التكوينات على زوجين من الأقطاب الكهربائية: أحدهما لنقل التيار، والآخر لقياس فرق الجهد. التوزيع الجغرافي يحدد النوع. يتم التمييز بين السبر والتنميط. السبر، وهو أكثر شيوعاً للاستخدام، له مركز ثابت ويتم استخدام تباعد الإلكترود المتنوع لرسم خرائط تغيرات المقاومة مع العمق، بينما في التنميط، تكون مسافات القطب ثابتة، وتتحرك المصفوفة بكاملها على طول خط الملف الخاص لرسم خرائط التغيرات الجانبية.

3. قياسات TEM

في أواخر الثمانينيات، بدأت طريقة جديدة في إحداث تأثيرها في استكشاف الطاقة الحرارية الجوفية واستبدلت تدريجيّاً سبر شلمبرغير كطريقة روتينية في استكشاف الطاقة الحرارية الجوفية لأول مسافة 1-1.5 كم من الأرض.

هذه هي طريقة TEM أو (الطريقة الكهرومغناطيسية العابرة Transient Electro-Magnetic method)، وهي طريقة كهرومغناطيسية تستخدم مصدراً خاضعاً للتحكم لإنشاء الإشارة المراد قياسها. في طريقة السبر TEM ذات الحلقة المركزية، والمشار إليها باسم TEM من الآن فصاعداً، يُنشأ حقل مغناطيسي ثابت عن طريق إرسال التيار الكهربائي عبر حلقة كبيرة (ثنائي القطب المؤرض). ثم يجري إيقاف التيار فجأة. ومن ثم إحداث حقل ثانوي، يضمحل بمرور الوقت. يراقب معدل الاضمحلال هذا عن طريق قياس الجهد المستحث في ملف استقبال في مركز الحلقة الموجودة على السطح.

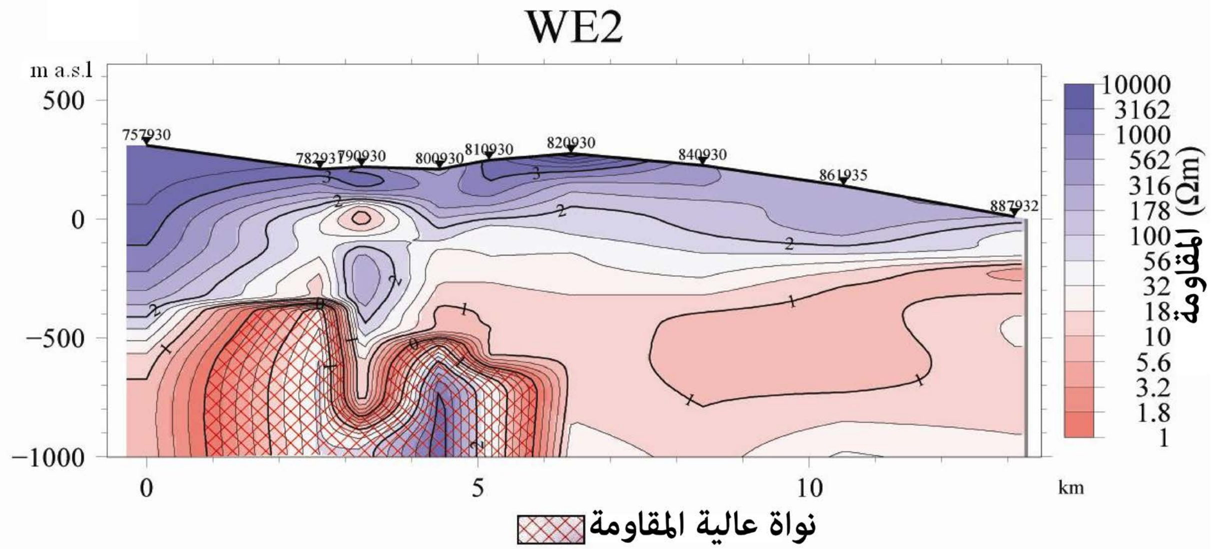
يعتمد معدل التوزيع والاضمحلال الحالي المُسجل كدالة للوقت على بنية المقاومة أسفل موقع القياس، ويمكن تفسيره على هذا النحو. يمكن أن تستند الإشارة أيضاً إلى ثنائي القطب المؤرض لإنشاء المجال المغناطيسي الأساسي.

يتم تقديم بيانات TEM على مقياس ثنائي اللوغاريتمي كبيانات DC، ولكن هنا ترسم المقاومة الظاهرية كدالة للوقت بعد إيقاف التيار.

معدات TEM متطورة ومكلفة نسبيّاً، على الأقل مقارنة بمعدات التيار المستمر. إلى جانب جهاز الاستقبال الذي يشتمل على جهاز تسجيل البيانات، يلزم توصيل جهاز إرسال بمولد كهربائي جيد قادر على توليد تيارات عالية (بترتيب 10 أمبير

ومن ثم حقل مغناطيسي قوي من خلال حلقة الإرسال. يجعل المولد الثقيل من الصعب إجراء القياسات عن طريق حمل الجهاز سيراً على الأقدام.

بالإضافة إلى ذلك، توجد حاجة إلى ملف قياس وأسلاك للحلقات بحيث تكون الأسلاك الحالية قادرة على حمل التيارات الثقيلة. من الناحية العملية، عادة ما تكون حلقة الإرسال الكبيرة عبارة عن مربع طول ضلعه 150-300 متر. مع معدات TEM التقليدية الجيدة وحلقة الإرسال 300 × 300 متر، مع TEM، من الممكن دراسة هياكل المقاومة وصولاً إلى مستويات أعماق تصل إلى 1 - 1.5 كم.



مقطع عرضي لمقاومة TEM ذات اتجاه W-E من الجزء الجنوبي الغربي من منطقة الحرارة الجوفية ذات درجة الحرارة العالية في هينغل Hengill، مما يُظهر شذوذاً في المقاومة قد يشير إلى مجال طاقة حرارية أرضي جديد حيث لا يوجد نشاط حراري أرضي معروف على السطح.



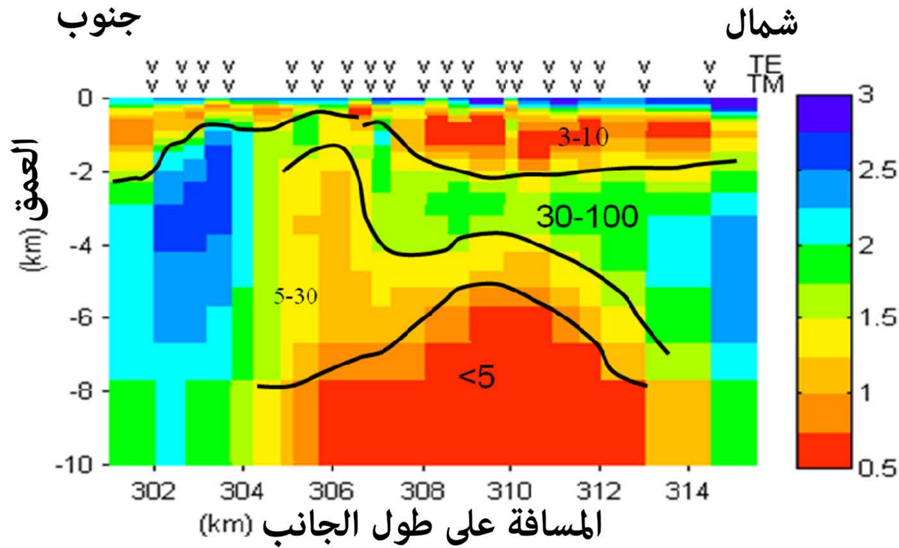
4. قياسات MT

MT أو الكهرومغناطيسية ذات المصدر الطبيعي تستخدم الحقل الكهرومغناطيسي الطبيعي للأرض كمصدر للطاقة. يحث الحقل المغناطيسي الطبيعي المتغير التيارات الكهربائية في الأرض الموصلة.

من خلال قياس إشارة المجال المغناطيسي المتذبذب والتيارات الكهربائية (أي الحقل الكهربائي) على سطح الأرض، من الممكن ربط ذلك بمقاومة الأرض أسفل موقع القياس.

يتعلق تردد الإشارة بعمق الفحص، حيث تصل الترددات المنخفضة إلى مستويات أعمق. ومن ثم، تستخدم ترددات من 0.00001 – 10 هرتز لأبحاث القشرة العميقة، في حين تستخدم ترددات أعلى، مثل 10 – 1000 هرتز، للقشرة العلوية.

تعد معدات MT بسيطة ومحمولة إلى حد ما مع مراقبة الحقل الكهرومغناطيسي من خلال الملفات المغناطيسية وثنائيات الأقطاب الكهربائية، من خلال نظام الحصول على البيانات، وعادة ما يجري توصيله بمحطة المرجع البعيدة للضوضاء الكهرومغناطيسية.



مقطع عرضي MT من منطقة مينينغاي Menengai ذات درجة الحرارة المرتفعة والحفرة في الصدع الكيني

5. قياســـات الجهـــد الذاتـــي

الجهد الذاتـي أو Self Potential (SP) هـي نـوع خـاصٌّ من القياسـات الكهربائيـة تهـدف إلـى رسـم خرائـط لمكون التيـار المسـتمر للإمكانـات الكهربائيـة الطبيعيـة للأرض. يمكن أن ترتبط الانحرافات الكبيرة بالنشاط الحراري الأرضي.

قد تتعلق الحالات الشاذة باختلاف درجة الحرارة مما يخلق إمكانات حرارية كهربائية، أو تدفق مائع من الماء السـاخن أو البـارد، ولكن قد تتأثر أيضاً بترسبات المعادن الموصلة أو التغيرات الكيميائية في الصخور أو سائل المسام.

لا تسـتخدم هـذه الطريقـة علـى نطـاق واسـع حيـث يصعـب تحديـد تفسـير البيانـات، لكنها لا تـزال تقـدم معلومـات مُهمَّـة. أهـم التطبيقـات هـي دراسـات الاستطلاع ورسم الخرائط وتتبع الأخطاء.



في اليابان، تستخدم الطريقة أيضاً لرصد المكمن بخاصة أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية التي يهيمن عليها السائل، بافتراض أن السبب الرئيسي لشذوذ SP هو إمكانية التدفق.

• القياسات المغناطيسية

تُستخدم الطرائق المغناطيسية على نطاق واسع في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، غالباً جنباً إلى جنب مع قياسات الجاذبية والانكسار الزلزالي، في رسم خرائط الهياكل الجيولوجية. تمغنط الصخور على نوعين:

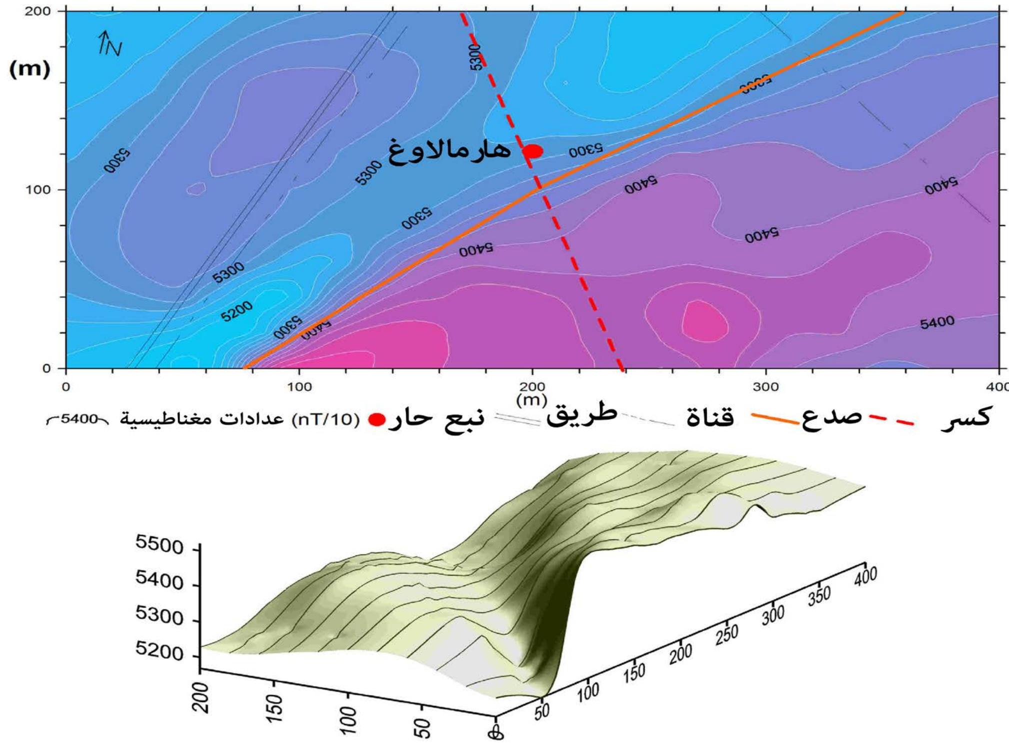
- المغنطة المستحثة Mi التي لها اتجاه نفس حقل الأرض المحيط.
- المغنطة الدائمة Mp التي غالباً ما تسود في الصخور النارية وتعتمد على خصائصها وتاريخها.

الشذوذ المغناطيسي هو اضطراب محلي أو إقليمي ناتج عن تغيير في المغنطة. يتميز باتجاه وحجم المغنطة الفعَّالة وشكل الجسم الشاذ وموضعه وخصائصه وتاريخه. عادة ما يقدر شدة الحقل المغناطيسي بوحدة γ (غاما) أو nT (نانوتيسلا). أجهزة قياس المغناطيسية هي معدات بسيطة إلى حد ما وسهلة الاستخدام.

لدى استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، تهدف القياسات المغناطيسية بشكل أساسي إلى تحديد مواقع الطَفْل المخفي وربما تقدير عمقها، أو تتبع السدود والصدوع الفردية المدفونة. قد تهدف أيضاً إلى إيجاد مناطق تمغنط منخفضة بسبب النشاط الحراري. تجري قياسات الهياكل المحلية مثل الصدوع الفردية أو السدود على الأرض عن طريق قياسات منتظمة على طول مقاطع جانبية متوازية أو في شبكة.

تهدف القياسات إلى تحديد حالات شاذة أكبر مثل رسم خرائط للتدخلات العميقة أو تحديد الأحواض الرسوبية من خلال المسوحات المغناطيسية الجوية، حيث يعتمد ارتفاع وتباعد المعالم على كثافة البيانات المفضلة.

في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية، غالباً ما يستخدم ارتفاع يبلغ نحو 100 متر فوق سطح الأرض و100 متر تباعد بين خطوط المظهر الجانبي، ولكن هذا يتأثر أيضاً بالتضاريس أسفل منها.



القياسات المغناطيسية في مجال الطاقة الحرارية الأرضية في أسغاردور في غرب أيسلندا، معروضة في الخريطة ومن خلال الأسطح ثلاثية الأبعاد. الشذوذ الرئيسي هو نموذجي للخطأ الناتج عن مغنطة مختلفة للصخور على كل جانب من جوانب الصدع.

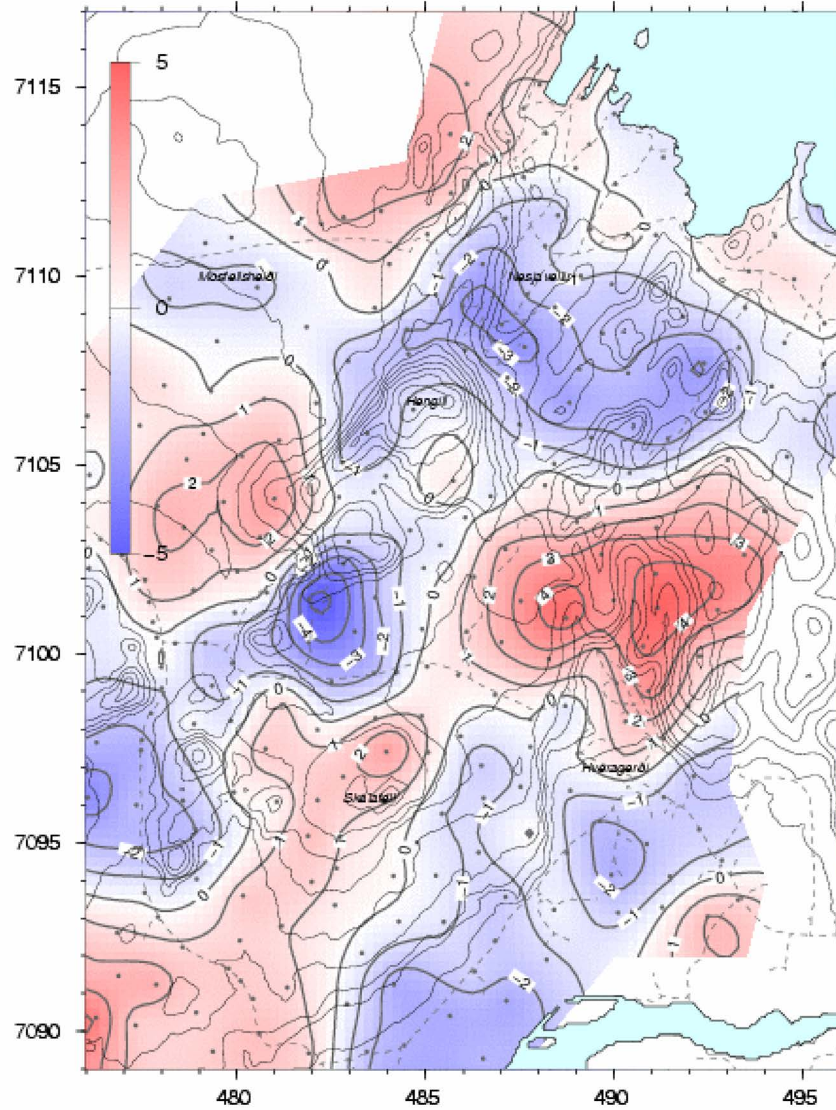
• قياسات الجاذبية

تستخدم قياسات الجاذبية لاكتشاف التكوينات الجيولوجية ذات الكثافات المختلفة. يؤدي تباين الكثافة إلى قوة جاذبية مختلفة يجري قياسها. تعتمد كثافة الصخور بشكل أساسي على تكوين الصخور ومساميتها، لكن التشبع الجزئي للصخور قد يؤثر أيضاً في القيم. عادة ما تكون الكثافة بين نحو 2 و 3 غرام / سم^3.

بشكل عامٍّ، تكون الصخور الرسوبية أخف من الصخور البلَّورية. البيانات الأولية تحتاج إلى تصحيح لعدة عوامل. عادةً ما يتم عرض النتائج أو عرضها في خرائط بوجيه Bouguer بناءً على شذوذ Bouguer ΔgB، حيث أجريت تصحيحات على القيمة المقاسة لتأثيرات المد والجزر والارتفاع والتضاريس المحلية وخط العرض والانحراف في مقياس الجاذبية.

تتشابه طرائق تفسير البيانات تماماً مع تلك المستخدمة في القياسات المغناطيسية. ومع ذلك، فإن طريقة الجاذبية محدودة إلى حد ما بسبب الغموض الذي يكتنف نظريّاً عدداً لا حصر له من توزيعات الكثافة يناسب مجال جاذبية معين. لذلك، هناك حاجة إلى معلومات أخرى لتكون قادرةً على إصلاح القيم، على سبيل المثال سماكة التكوينات وما إلى ذلك.

تشمل التطبيقات في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية رسم خرائط: تغيرات عمق الطابق السفلي في المناطق الرسوبية، والصخور المتطفلة المرتبطة أحياناً بمصدر حرارة محتمل، وأنظمة صدع أو سد، والتعديل/ التثبيت بسبب التأثيرات الحرارية.



خريطة جاذبية بوجيه لمنطقة هينغل ذات درجة الحرارة العالية؛ قد تشير مناطق الجاذبية العالية إلى عمليات اقتحام على مستويات أعمق.

• الطرائـــق الزلزاليـــة

تقيس الطرائق الزلزالية توزيع سرعة الصوت والشذوذ في الأرض بالإضافة إلى توهين الموجات الصوتية. وهي تنقسم إلى مجموعتين، طرائق نشطة حيث يستخدم مصدر خارجي لإنشاء موجات صوتية، مثل الانفجارات أو أجهزة المطرقة، بينما تكشف الطرائق السلبية عن النشاط الزلزالي في الأرض وتستخدم ذلك للحصول على معلومات حول المعالم (البارامترات) التي قد تكون مؤثرة في نظام الطاقة الحرارية الأرضية.

تعتمد الطرائق الزلزالية على الموجات المرنة التي لها سرعات مختلفة عند ارتحالها عبر أنواع الصخور المختلفة، وتتكسر أو تنعكس عند الانقطاعات في أو بين التكوينات. يوجد نوعان من الموجات المرنة:

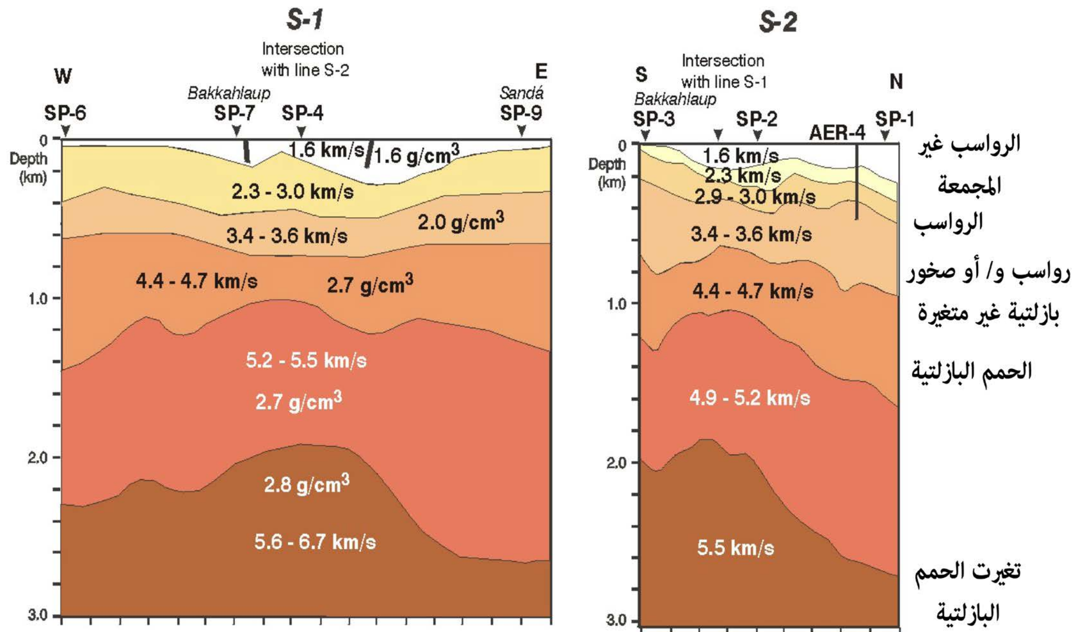
✓ **موجات P**، أو موجات الضغط، حيث تكون حركة الموجة في اتجاه الارتحال.

✓ **موجات S**، حيث تكون حركة المواد عمودية على اتجاه الموجة؛ بسبب حركة الأمواج، لا تخترق الموجات S السوائل، وإنما الصخور الصلبة فقط.

في القياسات النشطة، يجري التمييز بين قياسات الانكسار وقياسات الانعكاس، اعتماداً على الإجراءات. تقدم القياسات النشطة معلومات عن كثافة التكوينات، والمسامية والملمس، والحدود والانقطاعات والمناطق المملوءة بالسوائل ومن ثم درجة الحرارة. القياسات مكلفة جدّاً، وبخاصة قياسات الانعكاس الجيدة. ومع كونها الأكثر استخداماً من بين جميع الطرائق الجيوفيزيائية بصفتها طريقة رئيسية في التنقيب عن النفط، إلا أن القياسات الزلزالية النشطة، وبخاصة قياسات الانعكاس، لا تُستخدم بشكل روتيني في استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية.

يوجد النشاط الحراري الأرضي المرتفع بشكل أساسي داخل البراكين المركزية النشطة أو على الأقل المرتبطة بها، التي عادة ما تهيمن عليها أجسام معقدة من الصخور البلَّورية.

لذلك قد يكون من الصعب جدّاً تفسير المعلومات كما أن اختراق العمق ليس مرتفعاً، ومن ثم فإن الطريقة ليست فعَّالة من حيث التكلفة. تظهر قوة الطرائق النشطة في محيط رسوبي أفضل مقارنةً بالطرائق الأساسية المستخدمة في تكوينات نقل الزيت.



مقاطع عرضية عبر منطقة أوكسارفجوردور Oxarfjordur في شمال شرق أيسلندا، حيث يوجد النشاط الحراري الأرضي في محيط رسوبي، يُظهر طبقات التكوين بناءً على قياسات الانكسار وقياسات الجاذبية. إن السيطرة على الطبقات عالية السرعة في الجزء المركزي هي نتيجة النشاط الحراري الأرضي.



• الطرائـــق الجيولوجيـــة

في الطرائق الجيولوجية، يتم إجراء رسم خرائط أولي للآفاق المختارة، مثل الوحدات الجيولوجية الرئيسية والتكتونية والبراكين. يجري أيضاً تعيين المظاهر الحرارية مثل الينابيع الحارة والفومارول وما إلى ذلك والتغيير. تقاس الخصائص الفيزيائية للمظاهر السطحية مثل درجة الحرارة ومعدل التدفق والتوصيل وما إلى ذلك.

بدون فهم جيد لجيولوجيا المنطقة المرتقبة، يكون الاستكشاف مجرد تخمين بالكامل. النماذج الجيولوجية ثلاثية الأبعاد هي أسس استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية وتساعد بشكل رئيسي في تفسير التوقيعات الجيوكيميائية والجيوفيزيائية لأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

هذه النماذج ثنائية وثلاثية الأبعاد مصنوعة من خرائط جيولوجية مفصلة مكملة بجمع البيانات الجيوكيميائية والجيوفيزيائية، سواء من السطح أو تحت السطح. تطبق الخرائط التفصيلية للسطح، والتحليل الهيكلي للصدوع، وتفسير صور الأقمار الصناعية، وتحليل وتقييم توزيع المعادن، والتأريخ العمري لمظاهر الطاقة الحرارية الأرضية، والعديد من التقنيات الأخرى في العديد من المواقع والآبار لتحقيق نموذج موثوق به.

يمكن أن يوفر تطبيق التقنيات الجيولوجية نظرة ثاقبة حول سلوك وتطور نظام الطاقة الحرارية الأرضية الذي يتحكم فيه عن طريق الصدع النشط. يجري أيضاً تقييم توزيع النفاذية وأنماط تدفق السوائل وتوزيع الصدوع في المنطقة في البيئات الجيولوجية.

• الطرائـــق الجيوكيميائيـــة

تستخدم الأساليب الجيوكيميائية على نطاق واسع وتؤدي دوراً رئيسيّاً في التنقيب الأولي عن موارد الطاقة الحرارية الأرضية. تؤدي الدراسة الجيوكيميائية أيضاً دوراً مُهمّاً في الاستكشاف والاستغلال.

الهدف الرئيسي من الاستكشاف الجيوكيميائي هو الحصول على التركيب الجوفي للسوائل في نظام الطاقة الحرارية الأرضية. تعطي التركيبة المختلفة للسوائل معلومات مفصلة حول درجة حرارة الينابيع الساخنة، وأصل الينابيع الساخنة واتجاه التدفق.

تعمل البيانات الكيميائية للمياه الساخنة وتصريفات البخار كمؤشرات مفيدة لإمكانية إجراء مزيد من الاستكشاف في المنطقة بما في ذلك مواقع الحفر الأولية. تكامل المعلومات الهيكلية من الطرائق الجيولوجية والهيدرولوجية والجيوفيزيائية، يمكن للدراسة الجيوكيميائية أن توجه اتخاذ القرار بشأن الاستكشاف تحت السطحي عن طريق الحفر البارامترى.

يوفر التحليل الكيميائي للسوائل المستخرجة من أعماق مختلفة عن طريق الحفر معلومات مُهمَّة عن أنماط تدفق السوائل الجوفية.

علاوة على ذلك، تعتبر المسوحات الجيوكيميائية غير مكلفة نسبيّاً عند مقارنتها بالمسوحات الجيوفيزيائية والتحقيقات الجوفية عن طريق الحفر؛ لذلك تُستخدم الأدوات الجيوكيميائية حالياً على نطاق واسع في جميع مراحل استكشاف وتطوير الطاقة الحرارية الأرضية.



تُجرى الدراسات الجيوكيميائية للسوائل الحرارية بشكل رئيسي وفق ثلاث خطوات:

1. **أخذ عينات من الماء والغاز.**
2. **تحليل السوائل.**
3. **تفسير البيانات.**

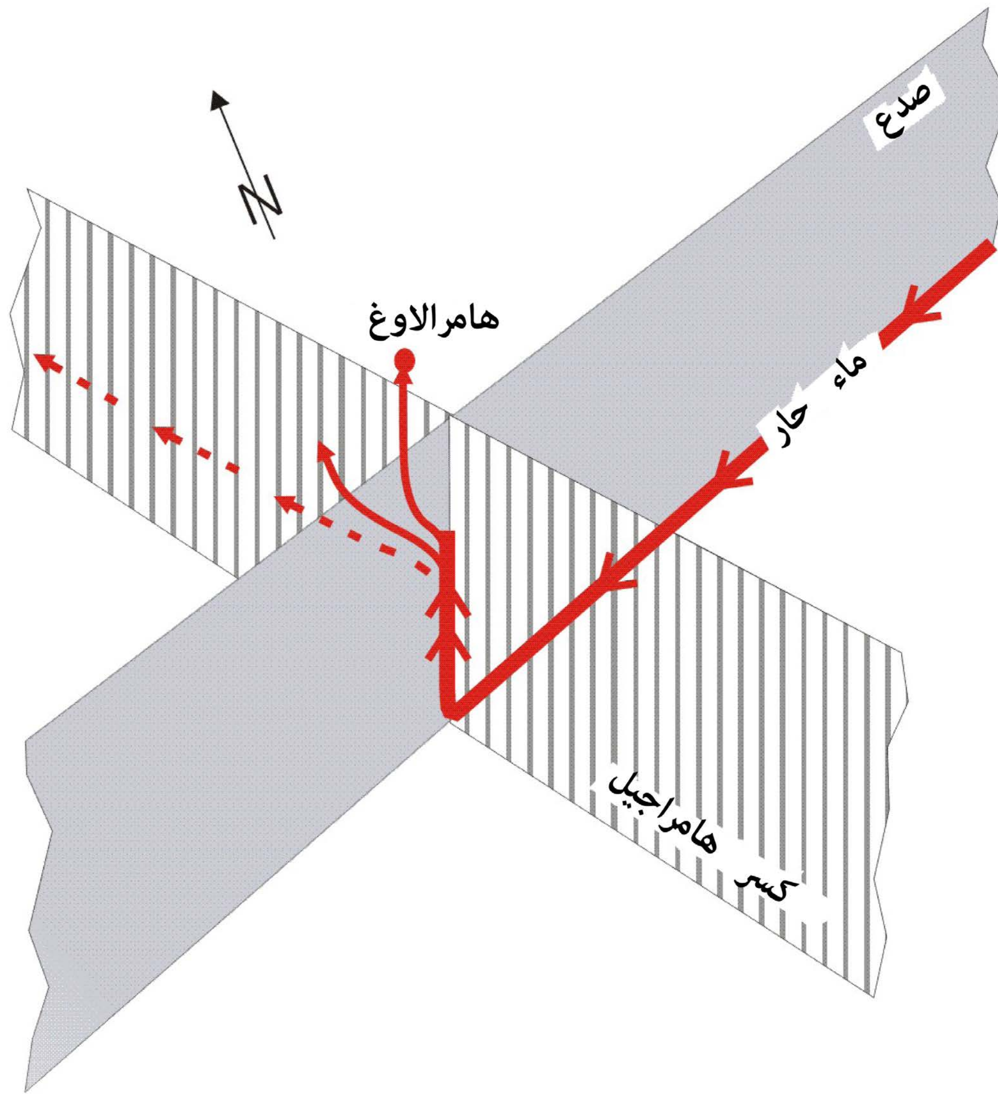
الهدف الرئيسي من الدراسة هو إجراء التحليل الجيوكيميائي لعينات المياه متبوعاً بتركيب البيانات الجيوكيميائية من أجل التأكد من طبيعة مصادر مياه الينابيع الحرارية وتفسير مختلف الظروف والعمليات الجوفية التي تتحكم في كيمياء المياه.

إن التحليل الجيوكيميائي مفيد لتقييم درجات حرارة الخزان وظروف التوازن باستخدام مقاييس حرارة أرضية مختلفة.

• الجمـع بين مختلـف الطرائـق

عادة ما تعتمد المسوحات الجيوفيزيائية الجيدة على مجموعة من الطرائق. من الضروري الحصول على فهم أفضل لنظام الطاقة الحرارية الأرضية. عادةً ما يُفضل استخدام الأساليب الروتينية، ولكن إذا لم تكن كافية، فيجب عندئذٍ مراعاة الطرائق الأخرى أو الطرائق المرتجلة.

يُعتقد أن صدع الاتجاه NE-SW الذي تم رسمه بواسطة القياسات المغناطيسية يحمل الماء نحو الحقل الحراري الأرضي من المرتفعات، لكن التدفق الحراري الأرضي (الحمل الحراري) يقع عند تقاطعه مع صدع شمالي غربي تم تحديده من خلال قياسات درجة حرارة التربة.



نموذج بسيط لنظام درجات الحرارة المنخفضة Asgardur في غرب أيسلندا، بناءً على نتائج قياسات درجة حرارة التربة والقياسات المغناطيسية.



مصـــادر الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة

في الفيزياء، الطاقة هي قدرة نظام مادي على القيام بعمل على أنظمة فيزيائية أخرى. هناك العديد من أشكال الطاقة المختلفة بما في ذلك الطاقة الميكانيكية (المحتملة، والحركية) والحرارية والكهربائية والكيميائية والنووية. يمكن فهم الطاقة الحرارية على أنها الحركة العشوائية للذرات والجزيئات.



نبع مياه حارة طبيعي موجود في دا كايدام، الصين.

يمكن تحويل أشكال الطاقة المختلفة من واحدة إلى أخرى. على سبيل المثال، يجري تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية في محرك الاحتراق. ويتحول إشعاع الحرارة الشمسية في النظام الكهروضوئي إلى تيار كهربائي.

نتج التمييز بين أشكال الطاقة المتجددة وغير المتجددة عن الرؤية المتزايدة بأن موارد الطاقة الطبيعية محدودة. تشمل أنواع الطاقة غير المتجددة، التي تسمى أيضاً موارد الطاقة الأحفورية، الفحم والنفط والغاز والوقود النووي، مثل (اليورانيوم). تتجدد هذه الأشكال من الطاقة في نطاقات زمنية ليست مثيرة للاهتمام لنظام الاقتصاد البشري الحالي.

تعتبر الطاقة الشمسية ممثل نموذجي للطاقة المتجددة. إن الإشعاع المنبعث من الشمس الناتج عن العمليات النووية الشمسية غير محدود ويستمر إلى الأبد من منظور الإنسان مع أنّ العمليات على الشمس ستتوقف عند استخدام الوقود النووي بالكامل.

يمكن تحويل الطاقة الإشعاعية التي تصل إلى الأرض إلى كهرباء (كهروضوئية) أو حرارة (حرارة شمسية). كما أن طاقة الرياح والطاقة الكهرومائية والكتلة الحيوية (الأخشاب ومحطات الطاقة) مشتقة في النهاية من الطاقة الشمسية. هذه الأشكال من الطاقة محدودة فقط بكمية الإشعاع التي تصل الأرض من الشمس بشرط استخدامها بطريقة مستدامة.

الطاقة متجددة بمعنى أن الشمس تغذي الطاقة المستهلكة في شكل ما، على سبيل المثال حطب النار والطاقة المحتملة للمياه في خزان كل يوم ولبعض الوقت.

لاحظ أيضاً أن أشكال الطاقة الأحفورية غير المتجددة مثل الفحم والنفط تمثل الطاقة الشمسية المخزنة. كما يجري تجديد أشكال الطاقة هذه مع أن المقاييس الزمنية ليست مثيرة للاهتمام للعمليات الاقتصادية البشرية قصيرة العمر.

أما الطاقة الحرارية الأرضية، فإنّ الحرارة في باطن الأرض هي طاقة لا ترتبط بالطاقة الشمسية، ولكنها في النهاية تشكلت بوساطة طاقة الجاذبية والانحلال الإشعاعي للذرات غير المستقرة. إنها متجددة بمعنى أن هناك كمية كبيرة جدّاً من الحرارة مخزنة في جسم الكوكب ولا يمكن للاستهلاك البشري أن يستنفد خزان الطاقة هذا.

يجري تجديد الطاقة الحرارية الأرضية المستهلكة من الخزان الكوكبي الداخلي وتكون غير محدودة من منظور الإنسان إذا استخدمت بشكل مستدام. استخدام موارد الطاقة المتجددة بشكل مستدام يعني أن معدل الاستهلاك يساوي أو أقل من معدل عملية التجديد بحيث إن الأجيال القادمة بإمكانها الاستفادة منها أيضاً. تتميز الطاقة المتجددة بعمليات تجديد سريعة وفق الجداول الزمنية البشرية.

من قوانين الفيزياء (قانون الديناميكا الحرارية) نعلم أنه لا يمكن إنشاء أو تدمير الطاقة، ولا يمكن تحويل الطاقة إلا من شكل واحد إلى آخر. يبقى المقدار الإجمالي للطاقة ثابتًا ولا يفقد أي شيء. يمكن تقليل قيمة قابلية الاستخدام لشكل واحد من أشكال الطاقة فقط أثناء التحويل والنقل.

لا يمكن استخدام العديد من أشكال الطاقة بشكل مباشر. بالنسبة للتطبيقات العملية، يجب تحويلها إلى أشكال قابلة للاستخدام. يجب تحويل الطاقة الكيميائية والطاقة النووية والطاقة الإشعاعية إلى طاقة ميكانيكية أو حرارية أو كهربائية.

يمكن تخزين الطاقة ونقلها. يجب تخزين مصادر الطاقة في وسائط تخزين محددة. على سبيل المثال، يمكن اعتبار مصادر الطاقة الأحفورية النموذجية



للأرض بما في ذلك الفحم والنفط والغاز في النهاية وسائط تخزين للطاقة الشمسية.

في الهندسة، الغرض من تخزين الطاقة هو جعلها قابلة للاسترجاع عند الطلب وقابلة للنقل. على سبيل المثال، يمكن تخزين الطاقة الكيميائية في بطاريات قابلة للنقل وتحويلها إلى طاقة كهربائية لتشغيل الجهاز عندما وحيثما تدعو الحاجة.

الحرارة التي جرى إنشاؤها على سبيل المثال في التركيب الشمسي يمكن تخزينها في مجمع حرارة واستخدامها عندما لا تشرق الشمس مؤقتاً. عادة ما تكون وسائط تخزين الحرارة عبارة عن سوائل (غالباً ماء) أو مواد صلبة (صخور عادةً). الماء مادة تخزين مفضلة بسبب سعته الحرارية العالية نسبيّاً.

من أجل منع فقدان الحرارة غير المرغوب فيه والتبريد السريع، يجب عزل جهاز التخزين حراريّاً. بالإضافة إلى مركمات أو (مدخرات) الحرارة التقليدية التي تعمل في درجات حرارة مرتفعة (مركم حرارة معقول)، تستخدم مركمات الحرارة الكامنة الحرارة الكامنة المرتبطة بانتقالات الطور لتخزين الطاقة الحرارية.

تبدأ مادة التراكم (على سبيل المثال) في الذوبان عند درجة حرارة انتقال الطور. ومع ذلك، يستمر التسخين الإضافي في إذابة المادة ولكن درجة الحرارة لا تتغير حتى يتم نقل كل المواد الصلبة إلى سائل (ذوبان التوازن). يخزن مركمات الحرارة الكامنة طاقة أكبر بكثير مما تخزنه مركمات الحرارة المعقولة. يشار إلى الخاصية على أنها ذات كثافة طاقة أعلى.

على سبيل المثال، فإنّ الطاقة التي يجب استثمارها لتحويل الماء إلى بخار عند 100 درجة مئوية تقابل 5.4 أضعاف الطاقة لتسخين الماء من 0 درجة مئوية إلى نقطة الغليان 100 درجة مئوية عند ضغط قدره 1 بار.

يجب تحويل الطاقة الأولية إلى طاقة صافية قبل أن يتمكن المستخدم من استهلاكها. لإنتاج 1 كيلوواط ساعة من الطاقة الكهربائية، هناك حاجة عادةً إلى 3 كيلو واط في الساعة من الطاقة الأولية، مثل: الفحم، والبترول. يعتبر جزء من الخسائر أثناء تحويل الطاقة جوهريّاً ولا يمكن تجنبه. تحدد نسبة الطاقة الصافية القابلة للاستخدام إلى الطاقة الأولية المستهلكة كفاءة تحويل الطاقة.

تنشأ خسائر التحويل -على سبيل المثال- في التحويل الصناعي للطاقة الكيميائية إلى طاقة حرارية كما هو الحال في محطة طاقة تعمل بالفحم أو في نظام تسخين الزيت المحلي من تفاعل غير كامل بسبب الظروف العملية والتقنية.

تُفقد الطاقة الحرارية من خزان الحرارة بسبب تدفق الحرارة الموصل؛ لذلك لا يمكن تخزين الحرارة في المنزل أو المبنى لفترات طويلة. في هذا السياق، يعد العزل الحراري للمنزل ميزة بناء أساسية.

يتطلب المنزل النموذجي في وسط أوروبا بدون عزل حراري خاصٍّ أكثر من 20 لتراً من وقود التدفئة لكل متر مربع سنويّاً. في المباني المعزولة منخفضة الطاقة، ينخفض استهلاك وقود التدفئة إلى 7 لتر/ م^2 في السنة. ويحرق المنزل السلبي المتطور 1.5 لتر فقط من الوقود لكل متر مربع في السنة لتغطية الطلب على الحرارة.



يترتب على الانتروبيا والقانون الثاني للديناميكا الحرارية أن اتجاهات عمليات تحويل الطاقة ليست متكافئة. على سبيل المثال، يمكن تحويل الطاقة الحركية الميكانيكية بالكامل إلى طاقة حرارية. في الاتجاه المعاكس، يكون التحويل دائماً غير مكتمل؛ تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية له كفاءة تحويل جوهرية أصغر من واحد. عمليات تحويل الطاقة متباينة الخواص أو غير متكافئة.

الطاقة الحرارية الأرضية أو الحرارة الأرضية هي الطاقة الحرارية المخزنة تحت سطح الأرض الصلبة. توفر الحرارة الأرضية المستعادة من أعماق مختلفة تحت السطح إمكانات فريدة ومختلفة للاستخدام. ومن ثم، ينقسم استخدام الحرارة الأرضية إلى أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية القريبة من السطح وأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية العميقة.

• أهميــــة الطاقــات المتجـــددة

تعتمد التنمية الاقتصادية لقطاع الطاقة أيضاً على عوامل لا تحدد على الفور على أنها ذات صلة بصناعة الطاقة. وتشمل هذه العوامل: التنمية السكانية، وعدد الأسر، والاتجاهات الاقتصادية العامة، والتغير الهيكلي والتقدم التكنولوجي.

بالإضافة إلى ذلك، تؤثر المعايير الاقتصادية والإطار القانوني والبيئة السياسية بشكل أكبر على نمو استهلاك الطاقة ووضع مبادئ توجيهية للتنمية العامة لاستخدام الطاقة واستهلاكها.

من المحتمل أن تكون الاحتياطيات العالمية المعروفة لسلع الطاقة التقليدية مثل الوقود الأحفوري والوقود النووي في حدود 35000 إكساجول (Exajoules $Ej = 10^{18}$ J)؛ هذا المقدار يعادل 90 ضعف إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة الأولية في عام 2007.

يمثل الفحم والليغنيت نحو 60 % من الاحتياطيات. توفر قسمة الاحتياطيات على نتائج الإنتاج الحالية النطاق الإحصائي لمصدر طاقة معين. النطاقات المقدرة باستخدام البيانات المتاحة من عام 2007 هي: 42 عاماً للنفط الخام، و61 عاماً للغاز الطبيعي، و129 عاماً للفحم و286 عاماً لليغنيت. النطاق الإحصائي للوقود النووي (اليورانيوم) بناءً على تقديرات الاحتياطيات في عام 2005 هو نحو 70 عامًا.

تمثل النطاقات الواردة أعلاه لقطات، ومع أنها تعاني من قدر كبير من عدم اليقين، إلا أنها ذات مغزى فقط في وقت التقدير. يعتمد النطاق الحقيقي الفعلي لأحد الموارد في الغالب على السعر الذي يرغب المستهلك في دفعه مقابل ذلك. إنها مسألة تتعلق بالسوق يتأثر بسعر الموارد والتقنيات المتنافسة من بين العديد من العوامل الأخرى.

عدد السنوات حتى استنفاد كل النفط وما إلى ذلك، يشير إلى أن السلعة لها نطاق محدود لأنها وقود أحفوري يتكون من عمليات جيولوجية أبطأ بكثير من الإنتاج والاستهلاك من قِبَل البشر.

لقد زاد الاستهلاك العالمي للطاقة بشكل كبير خلال الخمسين سنة الماضية بالتوازي مع النمو المتسارع لسكان العالم. تتوقع العديد من المصادر المختصة زيادة بمقدار ثلاثة أضعاف في الاستهلاك العالمي للطاقة وزيادة في عدد سكان العالم من 6 إلى 10 بليون شخص في الخمسين عاماً القادمة.

في عام 2003، بلغ إجمالي استهلاك الطاقة السنوي للفرد الواحد في الولايات المتحدة 330 غيغا جول (330×10^9 جول؛ حسب معهد الموارد العالمية). إذا سُمح لعشرة بليون من سكان هذا الكوكب في المستقبل باستخدام كمية



الطاقة نفسها التي استخدمها مواطنو الولايات المتحدة في عام 2003، فستستهلك احتياطيات عام 2005 في غُضون 10 سنوات تقريبًا.

يوضح هذا الاستعمال الصغير أن استخدام الطاقة المتجددة يجب أن يتطور بشكل كبير في المستقبل القريب إذا كان مستوى المعيشة المرتفع هدفاً لجميع سكان الكوكب.

بالتوازي مع تطوير الطاقة المتجددة، يجب استخدام الطاقة بشكل أكثر كفاءة، ويجب تقليل خسائر التحويل، ويجب جعل توفير الطاقة أمراً جذّاباً. تتطلب كفاءة الطاقة تقنيات إبداعية جديدة. يتطلب البحث والتطوير لهذه المعرفة الوقت والمال.

في السنوات الأخيرة، صار تغير المناخ العالمي وما يرتبط به من زيادة متوسط درجة حرارة السطح السنوية مصدر قلق كبير. من الواضح أن السبب الرئيسي للاحترار العالمي مرتبط بحرق الوقود الأحفوري وإطلاق ثاني أكسيد الكربون وغازات الدفيئة الأخرى في الغلاف الجوي الناتج عن هذه العملية.

تسهم تأثيرات الاحتباس الحراري لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ بنسبة 50 % من الاحترار العالمي الملحوظ. هناك العديد من الآثار غير المرغوب فيها والمكلفة جدّاً للاحترار العالمي على المدى الطويل. وتشمل هذه الآثار إزاحة مناطق الغطاء النباتي، وذوبان التربة الصقيعية، وذوبان القمم الجليدية القارية وما يرتبط بذلك من زيادة مستوى سطح البحر، وذوبان الجليد في سلاسل جبال الألب والآثار المرتبطة بذلك على إمدادات المياه والطاقة لمناطق واسعة في الأراضي الجبلية، والزيادة المتوقعة في خلق حالات جوية متطرفة.



تشغيل محطات الطاقة الكهربائية وأنظمة إنتاج الطاقة التي تستخدم الطاقات المتجددة، مثل الأنظمة الكهروضوئية والطاقة الكهرومائية والحرارية الأرضية خالية تماماً أو تقريباً من انبعاثات غازات الدفيئة. ومن ثم، فإن الطاقات المتجددة ليست فقط ذات أهمية حيوية لتوفير موارد الوقود الأحفوري ولكن أيضاً للحفاظ على الظروف البيئية.

تشمل الأهداف المعلنة للسياسات البيئية في العديد من البلدان زيادة كبيرة في استخدام الطاقة المتجددة لإنتاج الطاقة الكهربائية وفي إجمالي استهلاك الطاقة (الطاقة الكهربائية، والحرارة، والتنقل). في الوقت نفسه، تُبذل جهود كبيرة لتحسين كفاءة الطاقة لمحطات الطاقة الحالية. ويؤدي ذلك إلى تقليص سلع الطاقة والطاقة المستوردة، وتحسين مرونة نظام إمداد الطاقة وزيادة أمن الإمداد.

• حالة استخدام الطاقة الحرارية الأرضية

الولايات المتحدة لديها قدرة مركبة تبلغ 3.1 غيغاواط كهربائية من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية وهي الدولة الرائدة في استخدام الطاقة الحرارية الأرضية لإنتاج الطاقة الكهربائية. في جميع أنحاء أوروبا، ينتج نحو 1.4 غيغاواط من الكهرباء من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية.

يختلف الوضع من دولة إلى أخرى حسب الموارد الطبيعية المتاحة والتكنولوجيا لاستخدام هذه الموارد. تتراوح أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية العميقة المنتشرة من إنتاج البخار، من خزانات حرارة عالية المحتوى الحراري -على سبيل المثال- في أيسلندا وإيطاليا، إلى الاستخدام المباشر للخزانات الحرارية المائية في



الأحواض الرسوبية العميقة. بالقُرْب من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية السطحية، عادةً ما يمكن تثبيت المبادلات الحرارية البئر أو مجسات الطاقة الحرارية الأرضية أو مجسات مصدر الأرض عملياً في كل مكان.

في عام 2008، استخدمت الطاقة الحرارية الأرضية لإنتاج الطاقة الكهربائية في 24 دولة مختلفة. بلغ إجمالي السعة المركبة 10.9 غيغاواط. بالنسبة للجزء الأكبر، تنتج أنظمة البخار الجاف والبخار السريع هذه الطاقة الكهربائية من الخزانات عالية المحتوى الحراري التي تتميز بدرجات حرارة عالية عند العمق الضحل (تدرجات حرارة أرضية كبيرة جدّاً).

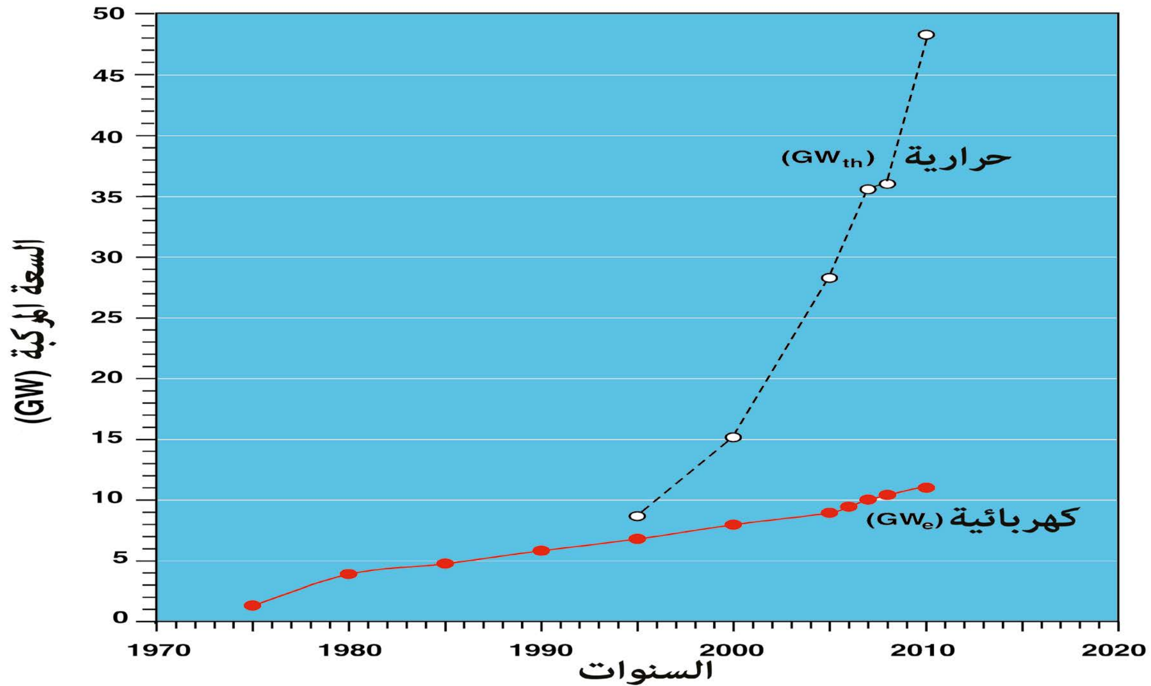
تستخدم هذه الأنظمة المفتوحة السائل المائي الحراري الأرضي المنتج مباشرةً لتشغيل التوربينات لتوليد الطاقة الكهربائية. الأقل شيوعاً هي الأنظمة المغلقة التي تستخدم الحرارة من السوائل الحرارية الأرضية المنتجة لتشغيل التوربينات في حلقة ثانوية في الخزانات ذات درجة الحرارة المنخفضة.

يجري تثبيت أنظمة البخار الجاف والبخار السريع -على سبيل المثال- في البلدان الآتية: الولايات المتحدة الأمريكية والفلبين والمكسيك وإندونيسيا وإيطاليا وأيسلندا وروسيا (كامتشاتكا وجزر كوريل) وتركيا والبرتغال (جزر الأزور) وفرنسا (غوادلوب).

بدأ إنتاج الطاقة الكهربائية من الخزانات الحرارية الأرضية منخفضة الحرارة باستخدام أنظمة ثنائية مثل محطات دورة رانكين العضوية Organic Rankine Cycle (ORC) أو مصانع كالينا منذ بضع سنوات وهي تعمل في عدد صغير نسبيّاً من المواقع.

تتمتع الأنظمة بإمكانات كبيرة والعديد من المواقع مناسبة تمامًا للأنظمة الثنائية منخفضة الحرارة. في الوقت الحاضر، يوجد العديد من المشروعات في مرحلة التطوير. إذا جرى تمديد هذه الأنظمة باستمرار، فإنها ستتمتع بقدرة كبيرة على المساهمة بشكل كبير في إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارة في المستقبل.

بعد عام 1975، ازداد استخدام الطاقة الحرارية الأرضية بشكل مستمر وملحوظ. في الفترة من 1980 إلى 2005، زادت السعة العالمية المركبة بشكل مستمر بنحو 200 ميغاواط سنويًا. بعد عام 2005، ارتفع النمو السنوي إلى 500 ميغاواط كهربائية.



سعة الطاقة الكهربائية والحرارية المركبة في جميع أنحاء العالم من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية منذ عام 1975.

في عام 2008، كان لدى الولايات المتحدة 3040 ميغاواط أعلى قدرة طاقة حرارية أرضية مثبتة في جميع أنحاء العالم. تلتها إندونيسيا (992 ميغاواط)، والمكسيك (958 ميغاواط)، وإيطاليا (811 ميغاواط)، ونيوزيلندا (632 ميغاواط)، أيسلندا (575 ميغاواط) واليابان (535 ميغاواط). رقم 2012 للولايات المتحدة هو 3187 ميغاواط كهرباء.

في عام 2005، استخدمت الطاقة الحرارية الأرضية لأغراض التدفئة في 72 دولة مختلفة. يقدر إجمالي السعة الحرارية المركبة بـ 45.8 غيغاواط في عام 2010. وتتضاعف السعة العالمية كل خمس سنوات.

تختلف هذه الأرقام بين الدول المختلفة وتعتمد بشدة على الظروف الجيولوجية. على سبيل المثال، لا يزال استخدام الطاقة الحرارية الأرضية العميقة في مهده في ألمانيا مقارنة بأيسلندا والولايات المتحدة ونيوزيلندا، بسبب عدم وجود حقول عالية المحتوى الحراري في وسط أوروبا.

ومع ذلك، تستخدم الطاقة الحرارية الأرضية بشكل متزايد في ألمانيا والبلدان الأخرى الأقل تفضيلًا من الناحية الجيولوجية ولها علامة واعدة. تتوقع تقديرات الحكومة الألمانية أن تسهم الطاقة الحرارية الأرضية بنسبة 0.5 % في إنتاج الطاقة الكهربائية و0.9 % في إنتاج الحرارة المفيدة بحلول عام 2020 وأن هذه الأجزاء ترتفع إلى 3.1-7.7 % على التوالي حتى عام 2050.



• علاقة التغيرات المناخية مع الطاقة الحرارية الأرضية

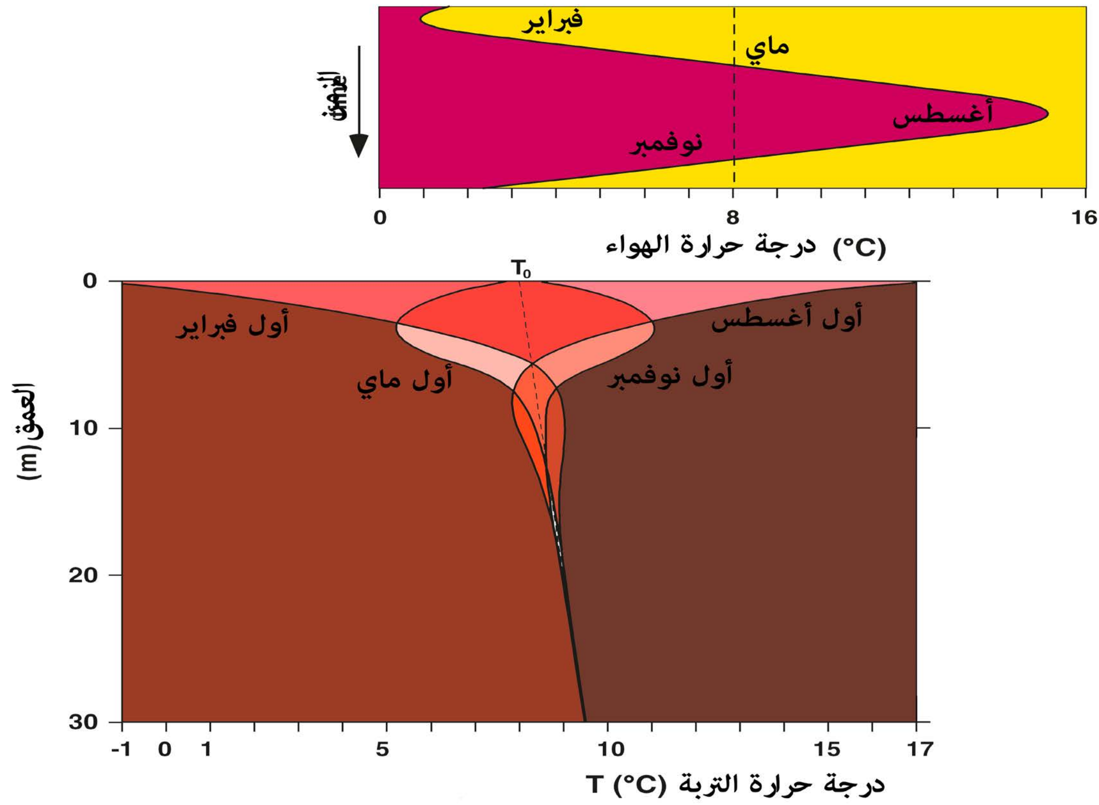
يتحكم المناخ في درجات الحرارة تحت السطحية في الأمتار العلوية من القشرة. في فصل الشتاء، يمكن أن تتجمد الأرض إلى عمق متر واحد في المناطق المناخية المعتدلة وتدفئتها بشكل كبير خلال فصل الصيف. تحدث المدخلات الحرارية بشكل مباشر عن طريق الإشعاع الشمسي وبشكل غير مباشر عن طريق التبادل الحراري مع الهواء ومياه الأمطار المتسربة.

تقل التغيرات الموسمية في درجة حرارة الأرض مع العمق. في المناطق المناخية المعتدلة، تختفي الدورة السنوية على عمق 10–20 متراً. عند هذا العمق، تكون درجة الحرارة ثابتة طوال العام وتتوافق قيمتها بشكل وثيق مع متوسط درجة حرارة السطح المحلية على المدى الطويل.

التأثيرات المناخية على نطاقات زمنية ممتدة مثل العصور الجليدية يمكن إدراكها في أعماق أكبر (على سبيل المثال 200 متر في وسط أوروبا). لا تزال عواقب العصور الجليدية على التدرجات الحرارية الأرضية المحلية مرئية حتى الوقت الحالي.

مع زيادة العمق، تزداد درجة الحرارة بسبب التدفق الحراري الأرضي ووفقاً للتدرج الحراري الأرضي المحلي. ينشأ جزء كبير من الطاقة الحرارية الأرضية المخزنة في هذه الصخور الساخنة بشكل متزايد في القشرة نفسها.





التباين السنوي في درجة حرارة الهواء والأرض في المناطق المعتدلة.

تميز صناعة الطاقة الحرارية الأرضية بين استخدام الطاقة الحرارية الأرضية القريبة والعميقة. تفصل الحدود النظرية عند عمق 400 متر و20 درجة مئوية بين حقلين مختلفين تماماً لاستخدامات الطاقة الحرارية الأرضية. علاوة على ذلك، يميز الاستخدام العميق للطاقة الحرارية الأرضية بين الخزانات عالية المحتوى الحراري وخزانات المحتوى الحراري المنخفضة.



يعكس المحتوى الحراري (الانتالبية) المحتمل الديناميكي الحراري المحتوى الحراري للمادة التي يرمز بالرمز H (الوحدة: جول Joule). يكون التمييز بين نوعي الخزانات عند درجة حرارة تقسيم تخيلية تبلغ 200 درجة مئوية.

يمكن إنتاج الطاقة الكهربائية بكفاءة عالية مباشرة من التوربينات البخارية حيث ينتج البخار من خزانات عالية المحتوى الحراري (في الحقول عالية المحتوى الحراري). يلزم درجات حرارة عالية تزيد على 200 درجة مئوية لضغط البخار الضروري باستخدام الماء كمواد لنقل الحرارة.

لا يمكن إنتاج الطاقة الكهربائية من الخزانات منخفضة المحتوى الحراري إلا باستخدام مواد نقل الحرارة ذات ضغط بخار أعلى. تستخدم محطات دورة رانكين العضوية (ORC) على سبيل المثال تعمل دورة البنتان والكالينا على تصنيع مخاليط الأمونيا والماء كمواد لنقل الحرارة.

تتراوح الكفاءة الكهربائية لهذه المحطات بين 10 و15% اعتماداً على مادة النقل ودرجة حرارة التشغيل.

عادةً ما توجد حقول المحتوى الحراري العالية للكوكب على طول أحزمة بركانية مرتبطة بحدود الصفائح التكتونية وأيضاً لتضمين الحقول البركانية ذات الصلة بأعمدة الوشاح أو (مجموعات منها كما هو الحال في أيسلندا).

ترتبط بعض الحقول عالية المحتوى الحراري أيضاً بالحمل الحراري المائي المرتبط بحجرات الصهارة الضحلة والاختراقات النارية القريبة من السطح في القشرة. تشير العديد من الصخور الأرضية إلى ضغوط تبلور تتراوح بين 50 و 100 ميغا باسكال تقابل أعماق اقتحام تتراوح بين 1.5 و 3 كيلومترات ودرجات حرارة تبلور تزيد على 650 درجة مئوية.



يمكن أن تكون التدرجات الحرارية الأرضية في مثل هذه المناطق مرتفعة جدّاً ويمكن الوصول إلى درجات حرارة تصل إلى 400 درجة مئوية على عمق ضحل جدّاً يصل إلى بضع مئات من الأمتار تحت السطح. في المناطق ذات المحتوى الحراري المرتفع، يعد إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية تقنية ناضجة وراسخة.

يجري توفير استهلاك الطاقة الكهربائية في سان فرانسيسكو بوساطة محطات الطاقة الحرارية الأرضية بنسبة تقارب 100 %. في أيسلندا، يتجاوز إنتاج الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية الاستهلاك المحلي مما أدى إلى إنشاء صناعات جديدة مستهلكة للطاقة. حتى تصدير الكهرباء من أيسلندا إلى أوروبا عبر الكابلات البحرية يعتبر مشروعاً قابلاً للتطبيق.

في أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية العميقة وحقول المحتوى الحراري المرتفع والمنخفض، يكون السائل الحراري الأرضي الذي ينقل الحرارة من الخزان إلى السطح عبارة عن ماء سائل طبيعي أو بخار اعتماداً على ظروف درجة الحرارة والضغط.

عادة ما يكون الماء غنياً بالمواد الصلبة والغازات الذائبة (مثل H_2S ، CO_2). في الحقول عالية المحتوى الحراري، يمكن أن يكون السائل المائي في حالة حمل حراري قوي بسبب تباينات الكثافة القوية الناتجة عن تدرجات درجات الحرارة العالية جدّاً. تتميز خلايا الحمل الحراري بمناطق تصاعد الماء الساخن والماء البارد النازل.

يمكن أن تهيمن أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية العميقة على الماء (السائل المسيطر) أو الغاز (بخار H_2O). في الأنظمة التي يسيطر عليها الماء الماء السائل

هو طور المائع المتحكم في الضغط، مع أنه قد يحوي على بعض الغاز المذاب، ولكن أقل من حالة التشبع. هذه الأنظمة شائعة جدّاً في نطاق درجة حرارة 125–225 درجة مئوية.

تنتج هذه الأنظمة ماءً سائلاً ساخناً، خليطاً من مرحلتين من الماء السائل والبخار، بخار رطب أو بخار جاف أحياناً اعتماداً على ظروف الضغط ودرجة الحرارة السائدة.

في الأنظمة التي يهيمن عليها الغاز، يتعايش الماء السائل والبخار في نظام من مرحلتين مع استمرار الغاز (البخار) كمرحلة للتحكم في الضغط.

أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية هذه أقل شيوعًا (مثل Larderello Italy و Geysers USA) من الأنظمة التي يهيمن عليها الماء السائل. الأنظمة التي يسيطر عليها الغاز تميز الحقول عالية المحتوى الحراري وتنتج بخاراً جافاً شديد التسخين، أي بخار عند درجات حرارة أعلى بكثير من نقطة التكثيف (على منحنى الغليان).

في المناطق ذات التدرجات الحرارية الأرضية العادية أو المرتفعة قليلاً، تنتج أنظمة المحتوى الحراري المنخفض ماءً دافئاً أو ساخناً اعتماداً على عمق البئر الذي يمكن استخدامه للتدفئة أو إمداد الطاقة الكهربائية. إذا كانت نفاذية الخزان منخفضة جدّاً بحيث يمكن استخلاص الحرارة من السوائل مباشرة في العمق بوساطة تحقيقات مصدر الأرض العميقة.

يمكننا أيضاً الاستفادة من الخزانات الحرارية المائية الأعمق والأكثر تركيزاً من الطاقة الحرارية الأرضية. يتم ذلك عن طريق حفر الآبار في الخزانات لاستخراج البخار الجاف (مع محتوى مائي منخفض)، أو البخار الرطب (مع نسبة عالية من الماء)، أو الماء الساخن، التي تستخدم بعد ذلك لتدفئة المنازل

والمباني، وتوفير الماء الساخن، زراعة الخضار في البيوت البلاستيكية وتربية الأسماك في أحواض الاستزراع المائي وتدوير التوربينات لإنتاج الكهرباء.

مصدر آخر للطاقة الحرارية الأرضية هو الصخور الجافة الساخنة الموجودة على عمق 5 كيلومترات أو أكثر تحت الأرض في كل مكان تقريبًا. يمكن حقن الماء من خلال الآبار المحفورة في هذا الصخر. بعد أن تمتص بعض الحرارة، يُضخ الماء إلى السطح، ويستخدم لتوليد الكهرباء، ثم يعاد حقنه في الأرض.

وفقًا للمسح الجيولوجي الأمريكي، فإن استغلال 2 % فقط من مصدر الطاقة الحرارية الأرضية هذا في الولايات المتحدة يمكن أن ينتج أكثر من 2000 ضعف الاستخدام السنوي الحالي للكهرباء في البلاد.

لكن الحفر في أعماق القشرة الأرضية مكلف. قد يحمل أيضًا خطر حدوث زلازل صغيرة. أدى هذا الاحتمال إلى إلغاء مشروع كبير للصخور الساخنة في سويسرا في عام 2009. ويمكن خفض التكلفة المرتفعة من خلال المزيد من البحث والتكنولوجيا المحسنة.

يرى بعض المحللين أن الطاقة الحرارية الأرضية، جنباً إلى جنب مع التحسينات في كفاءة الطاقة، واستخدام الخلايا الشمسية ومزارع الرياح لإنتاج الكهرباء، واستخدام الغاز الطبيعي كوقود مؤقت للجسور، تعد مفاتيح لمستقبل طاقة أكثر استدامة.

• مراحل استخراج الطاقة الحرارية الأرضية

1. بعد اكتمال التنقيب عن الطاقة الحرارية الأرضية والعثور على منطقة مناسبة للاستفادة من الخزان الذي بداخلها، تضخ محطات الطاقة الكبيرة الماء الساخن من خلال بئر حقن بضغط عالٍ.
2. عندما تعود المياه من الخزان إلى السطح من خلال بئر الإنتاج، يجري تحويلها إلى بخار، مما يسهل حركة التوربينات.
3. هذه التوربينات متصلة بمولد ينتج الكهرباء. ثم يبرد البخار فيما بعد ويحدث التكثيف مكوناً الماء.
4. يُضخّ الماء الذي جرى تبريده مرة أخرى عبر بئر الحقن، وتستمر العملية.

في المستقبل، من المتوقع أن تُستخدم الطاقة الحرارية الأرضية بكفاءة بدلاً من أشكال الطاقة الأخرى. والسبب في ذلك هو أنها شكل متجدد من الطاقة، وهو ليس نظيفاً فحسب، بل يوفر أيضاً طاقة كهربائية مستمرة. هذه الطاقة متوفرة دوماً ويجري إنتاجها في كل بلد. هذا يعني أيضاً أن بلداً به عدد كبير من محطات الطاقة الحرارية الأرضية.

• التكاليف الاقتصادية

في أنظمة الحلقة المغلقة، تزداد أو تنخفض درجة حرارة الأرض حول الآبار العمودية بشكل طفيف؛ يتحكم باتجاه تغير درجة الحرارة فيما إذا كان النظام يهيمن عليه التسخين (كما هو الحال في المناطق الأكثر برودة) أو التبريد (كما هو الحال في المناطق الأكثر دفئًا).

مع أحمال التسخين والتبريد المتوازنة، ستبقى درجات حرارة الأرض مستقرة. وبالمثل، فإن أنظمة الحلقة المفتوحة التي تستخدم المياه الأرضية أو مياه البحيرة سيكون لها تأثير ضئيل جدّاً على درجة الحرارة، بخاصة في المناطق التي تتميز بتدفقات عالية للمياه الأرضية.

بمقارنة فوائد الطاقة الحرارية الأرضية بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى، فإن الميزة الرئيسية للطاقة الحرارية الأرضية هي أن حملها الأساسي متاح 24 ساعة في اليوم، و7 أيام في الأسبوع، في حين أن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح متوفرة فقط في نحو ثلث الوقت.

بالإضافة إلى ذلك، تتراوح تكلفة الطاقة الحرارية الأرضية بين 5 و10 سنتات لكل كيلوواط / ساعة، وهو ما يمكن أن يكون منافساً لمصادر الطاقة الأخرى، مثل الفحم. يتمثل العيب الرئيسي في تطوير الطاقة الحرارية الأرضية في ارتفاع تكلفة الاستثمار الأولي في إنشاء المرافق والبنية التحتية والمخاطر العالية لإثبات الموارد.

لكن غالباً ما يعثر على موارد الطاقة الحرارية الأرضية في الصخور منخفضة النفاذية، وغالباً ما تقوم أنشطة الاستكشاف بحفر ثقوب جافة (أي الثقوب التي تنتج بخاراً بكميات منخفضة جدّاً بحيث لا يمكن استغلالها اقتصاديّاً) ومع ذلك، بمجرد إثبات المورد، فإن التكلفة السنوية الوقود (أي الماء الساخن والبخار) ينخفض ويميل إلى عدم تصاعد السعر.

• الإنتــاج العالمــي للطاقــة الحراريــة الأرضيــة

تُحفر الآبار في أعماق سطح الأرض للحصول على الطاقة الحرارية الأرضية وإحضار السائل الساخن أو البخار إلى سطح الأرض. ثم تستخدم المولدات لتحويل المنتج الساخن إلى كهرباء.

تستخدم الينابيع الساخنة أحياناً للحصول على الطاقة الحرارية الأرضية، ومع ذلك، لا توجد ينابيع ساخنة كافية على الأرض لتلبية احتياجاتنا، وقد جفت العديد من الينابيع الساخنة الموجودة مسبقاً بالفعل في فترة زمنية قصيرة نسبيّاً.



وقد أفادت الرابطة الدولية للطاقة الحرارية الأرضية (IGA) أن 10715 ميغاواط (MW) من الطاقة الحرارية الأرضية في 24 دولة، ومن المتوقع أن تولد 67246 غيغاواط ساعة من الكهرباء في عام 2010. ويمثل هذا زيادة بنسبة 20 % في قدرة الطاقة الحرارية الأرضية منذ 2005.

مشروعات IGA نمت إلى 18500 ميغاواط في عام 2015، بسبب العدد الكبير من المشروعات قيد الدراسة حالياً، غالباً في المناطق التي كان يُفترض سابقاً أنها تحوي على القليل من الموارد القابلة للاستغلال.

في عام 2010، قادت الولايات المتحدة العالم في إنتاج الكهرباء الحرارية الأرضية مع 3086 ميغاواط من القدرة المركبة من 77 محطة لتوليد الطاقة؛ تقع أكبر مجموعة من محطات الطاقة الحرارية الأرضية في العالم في The Geysers، وهو حقل للطاقة الحرارية الأرضية في كاليفورنيا.

تتبع الفلبين الولايات المتحدة كثاني أكبر منتج للطاقة الحرارية الأرضية في العالم، بقدرة 1904 ميغاواط؛ وتشكل الطاقة الحرارية الأرضية نحو 18 % من توليد الكهرباء في البلاد.

وفي يناير 2011 قال آل غور في قمة مشروع المناخ في آسيا والمحيط الهادئ إن إندونيسيا يمكن أن تصير دولة ذات قوة عظمى في إنتاج الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية.

كندا هي الدولة الرئيسية الوحيدة في منطقة حزام النار في المحيط الهادئ التي لم تطور بعد الطاقة الحرارية الأرضية. المنطقة ذات الإمكانات الأكبر هي الكندية كورديليرا، التي تمتد من كولومبيا البريطانية إلى يوكون، حيث تراوحت تقديرات الإنتاج من 1550 ميغاواط إلى 5000 ميغاواط.



اعتباراً من عام 2004، قامت خمس دول (السلفادور وكينيا والفلبين وأيسلندا وكوستاريكا) بتوليد أكثر من 15 % من الكهرباء من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية.

خلال عام 2005، أبرمت عقود للحصول على 500 ميغاواط إضافية من الطاقة الكهربائية في الولايات المتحدة، بينما كانت هناك أيضًا محطات قيد الإنشاء في 11 دولة أخرى.

تعمل أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المحسنة التي يبلغ عمقها عدة كيلومترات في فرنسا وألمانيا ويجري تطويرها أو تقييمها في أربعة بلدان أخرى على الأقل.

من الأفضل العثور على الطاقة الحرارية الأرضية في المناطق ذات التدرجات الحرارية العالية. تحدث هذه التدرجات في المناطق المتأثرة بالبراكين الحديثة، في المناطق الواقعة على طول حدود الصفائح (مثل على طول حلقة النار في المحيط الهادئ)، أو في المناطق التي تتميز بقشرة رقيقة (النقاط الساخنة) مثل منتزه يلوستون الوطني وجزر هاواي.

يجب أن تحوي الخزانات الحرارية الأرضية المرتبطة بهذه المناطق على مصدر حراري، وتغذية كافية للمياه، وخزان به نفاذية كافية تسمح للسوائل بالارتفاع بالقُرّب من السطح، وغطاء صخري غير منفذ لمنع تسرب الحرارة. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تكون هذه الخزانات متاحة اقتصاديّاً (أي ضمن نطاق الحفر).

يجري استغلال السائل المسخن من مورد طاقة حرارة الأرض عن طريق

حفر الآبار، وأحيانًا يصل عمقها إلى 9100 متر، ويستخرج عن طريق الضخ أو عن طريق التدفق الارتوازي الطبيعي (حيث يدفعه وزن الماء إلى السطح).

بعد ذلك يُضخ الماء والبخار إلى محطة الطاقة لتوليد الكهرباء أو من خلال خطوط الأنابيب المعزولة -التي يمكن دفنها أو وضعها فوق سطح الأرض- لاستخدامها في تطبيقات التدفئة والتبريد. بشكل عامٍّ، يقتصر طول خطوط أنابيب محطة الطاقة الكهربائية على 1.6 كيلومتر تقريباً لتقليل فقد الحرارة في البخار.

ومع ذلك، فقد رُكبت خطوط الأنابيب ذات الاستخدام المباشر التي تمتد لعدة عشرات من الكيلومترات مع فقدان درجة حرارة أقل من 2-5 درجات مئوية، اعتماداً على معدل التدفق. تقع المرافق الأكثر كفاءة من الناحية الاقتصادية بالقُرب من مصدر الطاقة الحرارية الأرضية لتقليل تكلفة إنشاء خطوط أنابيب طويلة.

في حالة توليد الطاقة الكهربائية، يمكن خفض التكاليف عن طريق تحديد موقع المنشأة بالقُرب من خطوط نقل الكهرباء لنقل الكهرباء إلى السوق.

• الاستنفاد

يمكن استنفاد موارد الطاقة الحرارية الأرضية إذا تجاوز معدل استخلاص الحرارة معدل إعادة الشحن الطبيعي بالحرارة. عادة، يمكن استخدام موارد الطاقة الحرارية الأرضية لمدة 20 إلى 30 عاماً؛ ومع ذلك، قد ينخفض إنتاج الطاقة بمرور الوقت، مما يجعل التطوير المستمر غير اقتصادي.



من ناحية أخرى، جرى إنتاج الطاقة الكهربائية الحرارية الأرضية باستمرار من حقل لارديريللو للطاقة الحرارية الأرضية منذ أوائل القرن العشرين وفي الفوارات الحارة منذ عام 1960. مع حدوث انخفاض في هذين الحقلين، إلا أنه جرى التغلب على هذه المشكلة جزئيّاً عن طريق حفر آبار جديدة وإعادة شحن إمدادات المياه.

في الفوارات الحارة، انخفضت القدرة الكهربائية من 1800 ميغاواط إلى ما يقرب من 1000 ميغاواط، ولكن تم إرجاع نحو 200 ميغاواط من خلال وضع الحقل تحت مشغل واحد وإنشاء خطوط أنابيب لتوصيل مياه الصرف الصحي لإعادة شحن الخزان.

تعمل مشروعات مثل نظام تدفئة منطقة ريكيافيك منذ ثلاثينيات القرن الماضي مع تغيير طفيف في الإنتاج، ويعمل نظام التدفئة الحرارية الأرضية التابع لمعهد أوريغون للتكنولوجيا منذ الخمسينيات من القرن الماضي دون أي تغيير في الإنتاج. ومن ثم، مع الإدارة السليمة، يمكن أن تكون موارد الطاقة الحرارية الأرضية مستدامة لسنوات عديدة، ويمكنها حتى التعافي إذا تم تعليق الاستخدام لفترة من الوقت.



استخدامات الطاقة الحرارية الأرضية

تستخدم بعض تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية درجات حرارة الأرض بالقُرّب من السطح، بينما تتطلب تطبيقات أخرى حفر أميال داخل الأرض.

الاستخدامات الثلاثة الرئيسية للطاقة الحرارية الأرضية هي: أنظمة الاستخدام المباشر وأنظمة التدفئة المركزية الماء الساخن من الينابيع أو الخزانات بالقُرّب من السطح.

تتطلب محطات توليد الكهرباء الماء أو البخار عند درجة حرارة عالية جدّاً (148 درجة مئوية إلى 371 درجة مئوية). تُبنى محطات الطاقة الحرارية الأرضية بشكل عامٍّ حيث توجد خزانات الطاقة الحرارية الأرضية على بُعْد ميل أو ميلن من السطح.

تستخدم مضخات الحرارة الأرضية درجات حرارة ثابتة للأرض أو الماء بالقُرّب من سطح الأرض للتحكم في درجات حرارة المبنى فوق سطح الأرض.

تتوفر الطاقة الحرارية الأرضية على مدار العام، أي 365 يوماً لملايين السنين طالما الأرض موجودة. يمكن أن تعمل محطات الطاقة الحرارية الأرضية بشكل مستمر على عكس محطات الطاقة الأخرى مثل طاحونة الرياح التي لا يمكن تشغيلها عندما لا توجد رياح كافية وتعتمد محطات الطاقة الحرارية المائية على توافر المياه الفائضة.

بشكل عامٍّ يمكن تقسيم استخدام الطاقة الحرارية الأرضية من الأرض إلى مباشرة وغير مباشرة.

أ. الاستخدامات المباشرة

1. الاستجمام والعلاج

يشمل الاستخدام المباشر الماء الساخن مباشرة دون معالجته أو تحويله إلى شكل آخر من أشكال الطاقة. مثل الينابيع الساخنة للاستحمام والمنتجعات الصحية والسياحية.

كما ذكرنا سابقاً كانت هناك استخدامات مباشرة للمياه الساخنة كمصدر للطاقة منذ العصور القديمة. فقد استخدم الرومان والصينيون والهنود الحمر الينابيع المعدنية الساخنة للاستحمام والطبخ والتدفئة. حالياً، لا تزال العديد من الينابيع الساخنة تستخدم للاستحمام، ويعتقد الكثير من الناس أن المياه الساخنة الغنية بالمعادن لها قُوى علاجية طبيعية.



تسهم السياحة الحرارية الأرضية في الاقتصاد وتوفر فرص العمل للأجيال الجديدة.

2. التدفئـــة والتبريـــد

في هذه الحالة تُضخّ المياه الساخنة من الأرض عبر الأنابيب مباشرة لتدفئة المنازل ومباني المكاتب. تضخ المياه الأرضية عبر مبادل حراري، حيث يتم نقل الحرارة من الماء إلى نظام تدفئة المباني. وفي الصيف تنعكس العملية.

لقد كان الفرنسيون يستخدمون هذه الطاقة للعديد من الأغراض منذ القرن الخامس عشر. وفي عام 1893، استخدمت الولايات المتحدة لأول مرة الطاقة الحرارية الأرضية لتسخين المناطق.

في هولندا، يجري تسخين ممرات الدراجات باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية لتجنب التجمد في الشتاء. كما يمكن استخدامها أيضاً لتدفئة الأرصفة والطرقات.

يمكن ضخ المياه الساخنة بالقُرْب من سطح الأرض مباشرة إلى المباني للتدفئة. يوفر نظام تدفئة المنطقة التدفئة لـ 95 % من المباني في ريكيافيك في أيسلندا.

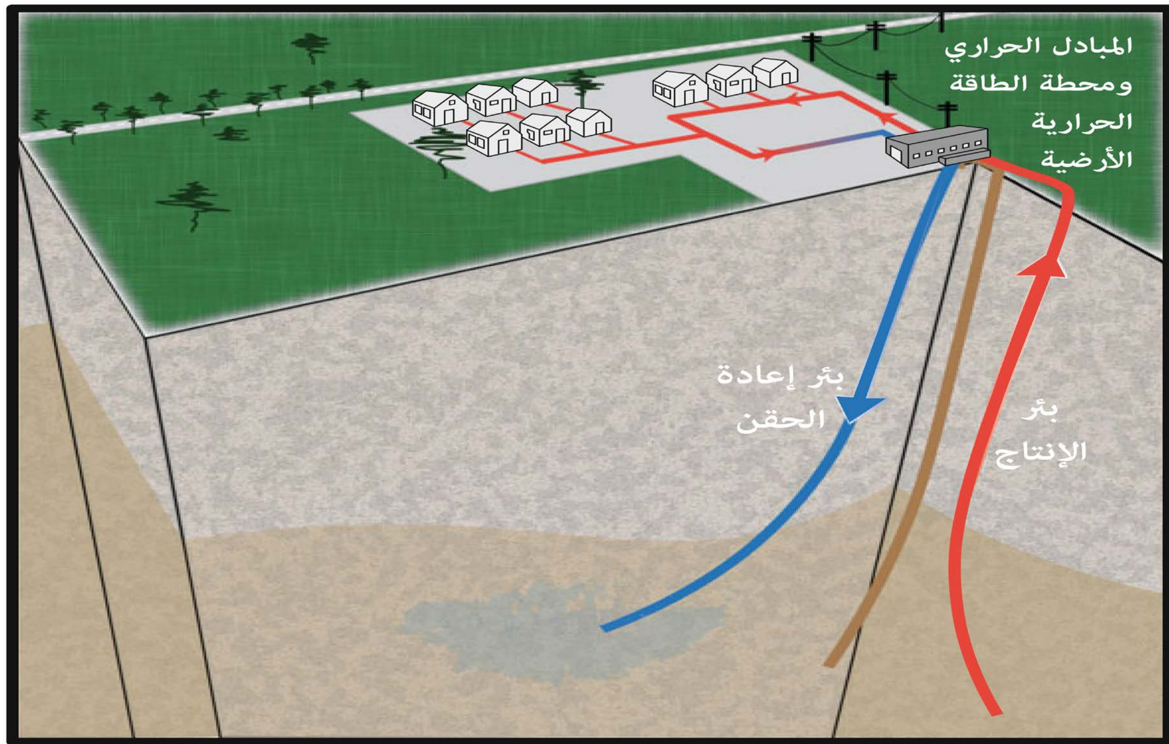
يمكن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية مباشرة بهيئة حرارة دون مزيد من التحويل إلى أنواع أخرى من الطاقة. يمثل الطلب على الحرارة حصة كبيرة من الاستهلاك النهائي للطاقة لتدفئة الأماكن، بخاصة في البلدان الباردة، وكذلك للعمليات الزراعية والصناعية.

يمكن أن يلبي إنتاج الحرارة الأرضية الطلب ببساطة عن طريق توفير السوائل عند درجة الحرارة المطلوبة. بعد الاستخراج من الأرض، يجري تدوير السوائل مباشرة في نظام التسخين أو، في كثير من الأحيان، تبادل الحرارة بالماء



النظيف من خلال مبادل حراري. يتم بعد ذلك إعادة حقن السوائل الأرضية في باطن الأرض في نظام نموذجي ثنائي أو ثلاثي.

تتضمن تقنيات الطاقة الحرارية الأرضية بشكل أساسي الموقع الأمثل، والوصول إلى السوائل واستخراجها من الأرض، وإدارة المبادل الحراري وإنتاج الحرارة كدالة للطلب الحراري، وإعادة حقن السوائل في الأرض. يجب تجنب أي تداخل مع طبقات المياه الأرضية الأخرى والتبريد الشامل لطبقة المياه الأرضية الأصلية الحرارية.



يستخدم نظام ثنائي- ثلاثي Doublet-Triplet لأغراض التدفئة. بئر الإنتاج (باللون الأحمر)، وبئر الحقن (باللون الأزرق). يمكن استخدام بئر ثالثة، (باللون البني)، اختياريًا للحقن والإنتاج، بدلاً من ذلك.

عادة ما تكون أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية كثيفة رأس المال والتكاليف الرئيسية هي الاستثمار الأولي في آبار الإنتاج والحقن، ومضخات الحفر. ومع ذلك، فإن نفقات التشغيل أقل من الأنظمة التقليدية، مع الأخذ في الاعتبار أن مصدر الطاقة مجاني ويمكن تعديل الإنتاج حسب الطلب على الطاقة.

عادة ما تكون درجة حرارة التشغيل في حدود 70–90 درجة مئوية، وتستلزم الوصول إلى عمق 1–3 كم.

الطريقة الموصوفة لاستخدام السوائل عند درجة الحرارة المطلوبة، والمعروفة باسم التسخين والتبريد السلبي أو الحُرّ (H&C)، هي واحدة من أكثر أشكال (H&C) المتاحة والصديقة للبيئة، وهي أساس معظم الاستخدامات الحرارية للطاقة الحرارية الأرضية حتى وقت قريب.

ومع ذلك، فإن الاستخدام السلبي له حدود؛ إذْ يجب أن يتكيف مع درجة حرارة المياه الأرضية الطبيعية المتاحة، وهو ليس ما نحتاجه دائمًا. بفضل التحسينات التي جرى إدخالها على آلات الامتصاص والمضخات الحرارية، المتوفرة بسهولة في السوق وقادرة على تسخين السوائل وتبريدها بكفاءة، صارت تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية مرنة بشكل متزايد.

تستغل أنظمة المضخات الحرارية الأرضية أو المضخات الحرارية الأرضية Geothermal or Ground Source Heat Pump (GSHP) في الغالب المياه الأرضية أو درجات حرارة الأرض المقترنة، وكذلك على عمق ضحل (10–200 متر عمق). كما تستغل أنظمة المضخات الحرارية المصاحبة الخاصية الفيزيائية للسوائل لامتصاص وإطلاق الحرارة عندما تتبخر أو تتكثف، على التوالي، وتحريك الحرارة من مكان (لإبقائه بارداً)، مما يؤدي إلى تفريغ الحرارة عند درجة حرارة أعلى (وضع التسخين).



تعمل أنظمة تكييف الهواء الشائعة بهذه الطريقة وتتبادل الحرارة مع الهواء الخارجي. وعند تركيب نظام عكسي معين، يمكن استخدام نظام المضخة الحرارية لكل من التدفئة والتبريد. في (GSHP)، يتبادل سائل التبريد الحرارة مع الأرض أو الماء المستخرج من الأرض.

تستفيد أنظمة (GSHP) المستخدمة في تطبيقات الطاقة الحرارية الأرضية الضحلة للتدفئة والتبريد من درجة الحرارة المستقرة على مدار العام في الأعماق الضحلة. في موسم البرد، تكون درجة حرارة الأرض أعلى من درجة حرارة الهواء، ويكون التبادل الحراري أكثر كفاءة من المضخات الحرارية التقليدية للهواء.

باستخدام التكنولوجيا الصحيحة، يمكن عكس العملية، ويمكن أيضاً أن تعمل المضخة الحرارية كثلاجة في الموسم الحار، باستخدام درجة حرارة الأرض الباردة لتبريد المكان.

من خلال الجمع بين الأنظمة الثنائية- الثلاثية لاستخراج السوائل في الأعماق العميقة بمضخات الحرارة الأرضية، هناك العديد من الخيارات التقنية الممكنة، بدءاً من إمداد الحرارة والبرودة إلى المنازل المفردة إلى توفير التدفئة للمدن أو المناطق بكاملها من خلال شبكات تدفئة المناطق الكبيرة.

تتطلب المضخات الحرارية كهرباء، يجب مراعاة تكلفتها في الميزانية الإجمالية، ولكنها توفر مزايا كثيرة. بادئ ذي بدء، تعد أنظمة (GSHP) أكثر كفاءة من أنظمة المضخات الحرارية لمصدر الهواء المعتاد، نظراً لأن مصدر الحرارة يحوي على درجة حرارة أقرب إلى درجة الحرارة المطلوبة.

بالإضافة إلى ذلك، فإن الجمع بين أنظمة (GSHP) وتقنيات الطاقة الحرارية الأرضية العميقة، يزيد من درجة حرارة السوائل المنتجة ويسهم في مرونة النظام، مما يجعل إنتاج الطاقة الحرارية الأرضية ممكناً في أي مكان.

في المؤتمر العالمي للطاقة الحرارية الأرضية لعام 2015، أُبلغ عن 83 دولة تستخدم الطاقة الحرارية الأرضية للتدفئة والتبريد بقدرة إجمالية مركبة تبلغ 70.3 غيغاواط.

على الصعيد العالمي، فإن الحصة الرئيسية من الإمكانات الحرارية المركبة هي أنظمة المضخات الحرارية الأرضية (55 %)، والاستحمام والسباحة بما في ذلك العلاج بالمياه المعدنية (20 %) وتدفئة المساحات (15 %، 89 % منها لتدفئة المناطق)، في حين أن الصوبات الزراعية مفتوحة تبلغ نسبة التدفئة الأرضية والتجفيف الزراعي فيها 5 %، وتربية الأحياء المائية والعمليات الصناعية وإزالة الجليد 4 %.

هناك العديد من العناصر التي يجب مراعاتها في تقدير تكلفة نظام الطاقة الحرارية الأرضية للتدفئة والتي غالباً ما تكون أكثر تعقيداً من الأشكال الأخرى للطاقة. يجب تقييم تكاليف تركيب وتشغيل المحطة بعناية قبل إطلاق مشروع الطاقة الحرارية الأرضية.

تعتمد التكلفة الإجمالية على المصدر (مقدار الحرارة، ومعدل تصريف السوائل، وعمق الحفر)، وتكلفة التركيب والتشغيل، والتعريفات والحوافز المتاحة، وسعر مصادر الطاقة المتاحة الأخرى، وكفاءة المحطة، ووقت التحميل.

تختلف التكلفة بشكل كبير حسب التطبيق. حيث تتراوح تكاليف تسخين المساحات في المناطق (أي النسبة بين تكلفة توليد أحد الأصول طوال عمره

الافتراضي والطاقة المنتجة) بين 45 دولاراً أمريكيّاً / ميغاواط في الساعة و 85 دولاراً أمريكيّاً / ميغاواط ساعة، وتتراوح تكاليف تدفئة الصوبات الزراعية بين 40 دولاراً أمريكيّاً / ميغاواط في الساعة والولايات المتحدة 50 دولار / ميغاواط ساعة.

تعد تقديرات IPCC للتكاليف عام 2012 أكثر شمولاً، ولكنها لا تزال بهامش كبير من عدم اليقين، بسبب الافتقار إلى معايير القياس ومجموعة البيانات الكاملة.

يقدر العلماء أن استخدام 1 % فقط من الحرارة المخزنة في أعلى 5 كيلومترات من القشرة الأرضية سيوفر طاقة تزيد بمقدار 250 مرة عن تلك المخزنة في جميع احتياطيات النفط الخام والغاز الطبيعي على الأرض.

تتمثل إحدى طرائق التقاط الطاقة الحرارية الأرضية في استخدام نظام المضخة الحرارية الأرضية. يمكنه تدفئة المنزل وتبريده عن طريق استغلال اختلاف درجات الحرارة، تقريباً في أي مكان في العالم، بين سطح الأرض وتحت الأرض على عمق 3-6 أمتار، حيث تتراوح درجة حرارة الأرض عادةً بين 10 و 20 درجة مئوية على مدار السنة.

في فصل الشتاء، تقوم حلقة مغلقة من الأنابيب المدفونة بتدوير سائل يستخرج الحرارة من الأرض ويحملها إلى مضخة حرارية تنقل الحرارة إلى نظام توزيع الحرارة في المنزل. في الصيف، يعمل هذا النظام في الاتجاه المعاكس، حيث يعمل على إزالة الحرارة من داخل المنزل وتخزينها في الأرض.



في حين أن درجات الحرارة فوق سطح الأرض تتغير كثيراً من يوم لآخر ومن موسم إلى آخر، فإن درجات الحرارة 3 أمتار تحت سطح الأرض ثابتة تقريباً بين 10 درجات مئوية و15 درجة مئوية.

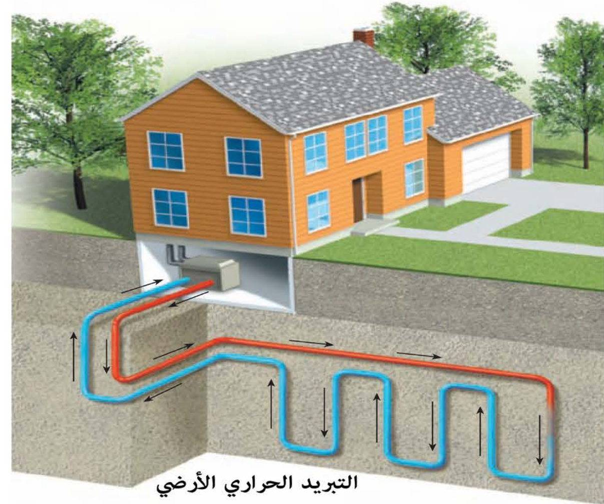
بالنسبة لمعظم المناطق، هذا يعني أن درجات حرارة التربة تكون عادة أكثر دفئاً من الهواء في الشتاء وأكثر برودة من الهواء في الصيف. تستخدم مضخات الحرارة الأرضية درجات حرارة الأرض الثابتة لتدفئة المباني وتبريدها. فهي تنقل الحرارة من الأرض أو (الماء) إلى المباني في الشتاء وعكس العملية في الصيف.

ووفقاً لوكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA)، تعد المضخات الحرارية الأرضية أكثر الأنظمة كفاءة في استخدام الطاقة ونظيفة بيئياً وفعَّالة من حيث التكلفة للتحكم في درجة الحرارة.

مع أن معظم المنازل لا تزال تستخدم الأفران التقليدية ومكيفات الهواء، إلا أن المضخات الحرارية الأرضية أصبحت أكثر شيوعاً. في السنوات الأخيرة، دخلت وزارة الطاقة الأمريكية ووكالة حماية البيئة في شراكة مع الصناعة لتعزيز استخدام المضخات الحرارية الأرضية.

وفقاً لوكالة حماية البيئة (EPA)، يعد نظام المضخات الحرارية الأرضية المصممة جيداً الطريقة الأكثر كفاءة في استخدام الطاقة وموثوقية ونظيفة بيئيّاً وفعَّالة من حيث التكلفة لتسخين أو تبريد مساحة، وهي الثانية بعد العزل الفائق. لا ينتج أي ملوثات للهواء ولا ينبعث منه ثاني أكسيد الكربون. يمكن أن تكون تكاليف التثبيت مرتفعة ولكن يجري تعويضها بشكل عامٍّ بعد 3–5 سنوات؛ بعد ذلك، توفر هذه الأنظمة المال لأصحابها.







يمكن لنظام المضخات الحرارية الأرضية تدفئة أو تبريد المنزل في أي مكان تقريباً. يقوم بتدفئة المنزل في الشتاء عن طريق نقل الحرارة من الأرض إلى المنزل (كما هو موضح هنا). في الصيف، يتم تبريد المنزل عن طريق نقل الحرارة من المنزل إلى الأرض.

ب. الاستخدامات غير المباشرة

يجري تحويل الطاقة الحرارية الأرضية المتولدة إلى شكل آخر من أشكال الطاقة، والتي يمكن استخدامها في المجالات الآتية:

1. تربية الأحياء المائية

يمكن استخدام الطاقة الحرارية الأرضية في تربية الأحياء المائية التي تحتاج إلى ماء دافئ لتنمو. ففي هذا النوع من التربية تكون أشكال الحياة المائية كافة خاضعة للرقابة. يعتمد حجم التركيب على درجة حرارة مصدر الطاقة الحرارية



الأرضية (عادة بضع عشرات من درجات مئوية)، ودرجة الحرارة المطلوبة في أحواض الأسماك، وفقدان الحرارة من هذه الأحواض.

الحيوانات مثل التمساح والمحار والأسماك الاستوائية وسمك السلور والسلمون المرقط... إلخ، تشعر بالراحة في الماء الدافئ.

يستخدم الناس من أيداهو والصين واليابان وأيسلندا وأوريجون الطاقة الحرارية الأرضية لتربية الأحياء المائية.

مزرعة الجمبري الوحيدة في العالم التي يجري تسخينها باستخدام حرارة المياه العادمة لمحطة واياراكي لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية قبل أن تلتقي بالنهر، وقد باعت مزرعة الجمبري هذه ما يقرب من عشرين طناً في عام 2005.

2. البستنة

تستخدم البيوت المحمية (الدفيئة) الطاقة الحرارية الأرضية للحفاظ على جو دافئ ورطب من خلال الاستفادة من البخار والحرارة الناتجة عن الطاقة الحرارية الأرضية.

تتكون التطبيقات الزراعية للسوائل الحرارية الأرضية، عادة عند درجة حرارة تشغيلية تصل إلى بضع عشرات من درجات مئوية، للتحكم في درجة حرارة زراعة النباتات في الحقول المفتوحة (نادراً ما تستخدم) والصوبات الزراعية. يجري توفير تسخين التربة عن طريق دفن خطوط الأنابيب الرفيعة، ومن ثم تتداول السوائل الدافئة.

يمكن تسخين الدفيئة عن طريق الدوران القسري للهواء في المبادلات الحرارية، أو أنابيب تدوير الماء الساخن أو القنوات الموجودة في الأرض أو فوقها،



والوحدات ذات التوربينات الموجودة على طول الجدران وتحت المقاعد، أو مزيج من هذه الطرائق.

3. الـــــزراعـــــة

استخدمت الطاقة الحرارية الأرضية على نطاق واسع من قِبَل المزارعين على مر السنين لزراعة النباتات غير الموسمية.

يستخدم المزارعون في فصل الشتاء المياه الأرضية الدافئة لزراعة النباتات خلال فصل الشتاء في توسكانا.

الاستخدام الكبير للطاقة الحرارية الأرضية في مجال الزراعة نجده في المجر حيث تستمد نحو 80 % من احتياجاتها من الطاقة من تكنولوجيا الطاقة الحرارية الأرضية للزراعة.

4. الصنـــــاعـــــة

تؤدي الطاقة الحرارية الأرضية دوراً كبيراً وحيويّاً في الكثير من العمليات الصناعية. المصدر الذي يحصلون عليه من خلال استخدام الطاقة الحرارية الأرضية يكون مجانياً بمجرد تشغيل المحطة كما أن توفرها لا يمكن إيقافه.

في نيوزيلندا، تقوم صناعة الورق واللب في تاسمانيا بتجفيف الأخشاب باستخدام الحرارة من البخار الحراري الأرضي عن طريق تمريرها عبر المبادلات الحرارية لتسخين هواء الفرن حتى درجة حرارة تصل إلى 140 درجة مئوية.

تشمل التطبيقات الصناعية الأخرى بشكل أساسي عمليات التبخير، والتقطير، والغسيل، وإزالة الجليد، وتعدين الذهب، واستخراج الملح، وصناعة



الجلود، والاستخراج الكيميائي، واستخراج ثاني أكسيد الكربون، واستخدام الغسيل، وحمض البوريك. وتمتد درجة حرارة التشغيل على نطاق واسع، من بضع عشرات حتى 100 درجة مئوية.

5. الصناعات الغذائية

يمكن استخدام البخار الناتج عن الطاقة الحرارية الأرضية لتعقيم المعدات وغرف تجهيز الأغذية والتخزين بحيث يمكن تجنب استخدام الأدوية أو أي مواد كيميائية أخرى.

باستخدام الحرارة، يمكن تجفيف العديد من النباتات والفواكه وبسترة الحليب وتشغيلها لمزيد من الاستخدام.

لقد استخدمت الحرارة الأرضية من محطة أوهاكي في صنع كريات عالية البروتين عن طريق تجفيف المخزون، كما تُستخدم أيضاً لصنع مُركّز بروتيني من العصير المجفف.

تطبيقات ثانوية أخرى لتعبئة المياه والمشروبات الغازية، واستعادة الزيت، وتجهيز الأغذية.

توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية

تسهم الطاقة الحرارية الأرضية بشكل كبير في إنتاج الكهرباء ويمكن أن توفر كمية كبيرة أيضاً دون أي ضرر كبير على البيئة.

مبلغ نحو 280 مليون دولار سنويّاً هو المنفعة الاقتصادية لحكومة الولايات المتحدة باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية. وهناك ما يقرب من 450 مشروعاً للطاقة الحرارية الأرضية قيد الإنشاء في الولايات المتحدة لتلبية احتياجات الكهرباء الكبيرة.

الولايات المتحدة هي الرائدة في مجال توليد الطاقة الحرارية الأرضية. تتصدر الولايات المتحدة العالم في توليد الكهرباء باستخدام الطاقة الحرارية الأرضية. في عام 2011، أنتجت محطات الطاقة الحرارية الأرضية في الولايات المتحدة نحو 17 بليون كيلوواط/ ساعة، أو 0.4 % من إجمالي توليد الكهرباء في الولايات المتحدة. في عام 2011، كان لدى خمس ولايات محطات لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية:

- كان لدى كاليفورنيا 35 محطة لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية، التي أنتجت 80 % من كهرباء الطاقة الحرارية الأرضية في الولايات المتحدة.
- كان لدى ولاية نيفادا 20 محطة لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية، التي أنتجت 16 % من الكهرباء الحرارية الأرضية في الولايات المتحدة.
- كان في ولاية يوتا محطتان، وكان لكل من هاواي وأيداهو محطة واحد للطاقة الحرارية الأرضية.

الولايات المتحدة هي أكبر منتج في العالم للكهرباء الحرارية الأرضية من الخزانات الحرارية المائية. يجري إنتاج معظمها في كاليفورنيا ونيفادا ويوتا وهاواي.

إنها تلبي احتياجات الكهرباء لنحو 6 ملايين أمريكي - وهو رقم يساوي تقريباً مجموع سكان لوس أنجلوس وكاليفورنيا وهيوستن بتكساس - وتوفر ما يقرب من 6 % من كهرباء كاليفورنيا. وهناك مجال كبير للنمو، لأن الطاقة الحرارية الأرضية تولد 0.4 % فقط من الكهرباء المستخدمة في الولايات المتحدة.

لقد كان لدى أربع وعشرين دولة، بما في ذلك الولايات المتحدة، محطات لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية في عام 2010، التي أنتجت ما مجموعه نحو 63.9 بليون كيلوواط ساعة.

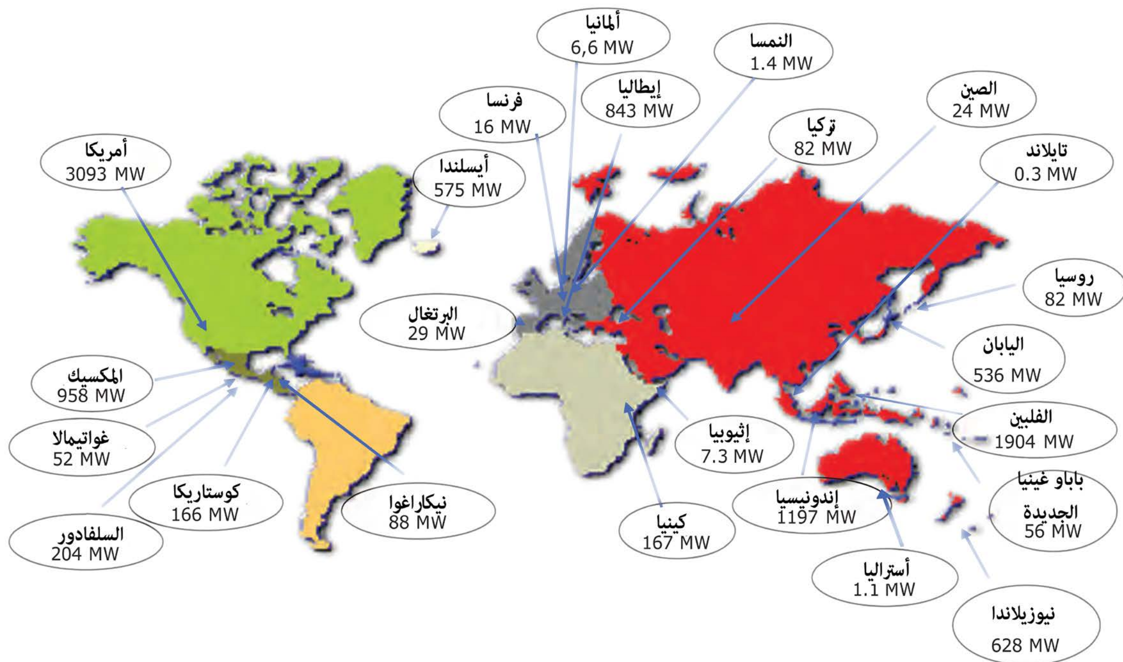
أيسلندا، سابع أكبر منتج عند 4.3 بليون كيلوواط ساعة، أنتجت 26 % من إجمالي الكهرباء لنا. تحصل أيسلندا على كل طاقتها من الكهرباء تقريباً من محطات الطاقة الكهرومائية والطاقة الحرارية الأرضية.

في الفلبين، توفر محطات الطاقة الحرارية الأرضية الكهرباء لـ 19 مليون شخص. والفلبين ثاني أكبر منتج للطاقة الحرارية الأرضية بعد الولايات المتحدة عند 9.4 بليون كيلوواط في الساعة، وهو ما يعادل نحو 16 % من إجمالي توليد الطاقة في البلاد.

وتمتلك الصين إمكانات كبيرة للطاقة الحرارية الأرضية، التي يمكن أن تساعد البلاد على تقليل اعتمادها على محطات الطاقة التي تعمل بالفحم.

يمكن استغلال مواقع تخزين الحرارة الأرضية التي ليست بعيدة عن السطح عن طريق ضخ المياه فيها. ثم يُضخّ الماء الساخن إلى السطح واستخدامه

لتسخين السوائل بنقاط غليان منخفضة. يؤدي هذا إلى إطلاق بخار يمكن أن يدور توربينيّاً لتوليد الكهرباء. ويعمل العلماء والمهندسين على إيجاد طرائق لتحسين كفاءة الأنظمة المستخدمة.



خريطة للطاقة الكهربائية الحرارية الأرضية المركبة عالمياً بقدرة 10.7 غيغاواط في عام 2009.

• أنــواع محطــات توليــد الطاقــة الكهربائيــة

تنتج معظم أنواع محطات توليد الكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية من خلال مولد يجري تنشيطه بوساطة توربينات تدار بوساطة تدفق البخار. تقوم محطات الوقود الأحفوري بتبخير الماء، بينما تستخدم محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية البخار الناتج من السوائل الساخنة تحت الأرض أو المسخن بواسطتها.

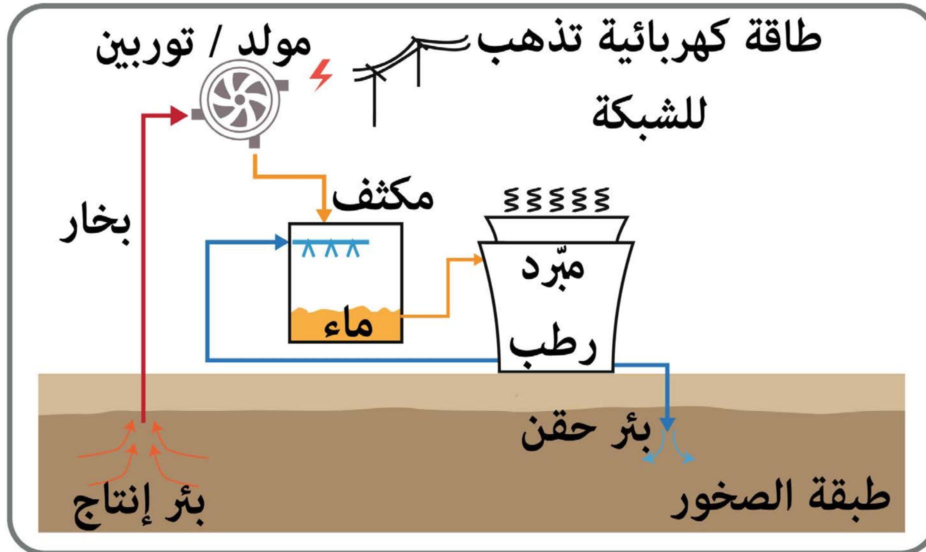


يوجد عدة أنواع رئيسية من التكنولوجيا الحديثة المستخدمة في هذا المجال سنتعرف عليها فيما يأتي:

1. محطـــات البخـــار الجــاف

في محطات البخار الجاف Dry Steam Plants، التي تُستخدم عندما تكون السوائل الحرارية الأرضية في حالة بخار عندما تصل إلى السطح، يُنقل البخار مباشرة من الآبار الأرضية إلى محطة الطاقة، حيث يجري نقله إلى وحدة التوربينات/ المولدات.

يمكن أن تكون السوائل في حالة بخار كلية بالفعل في الخزان، وهو أمر نادر الحدوث، أو مشتقة من خليط من السائل والبخار في الخزان والذي يتبخر - بسبب انخفاض الضغط الناجم عن البئر- تماماً قبل الوصول إلى السطح.



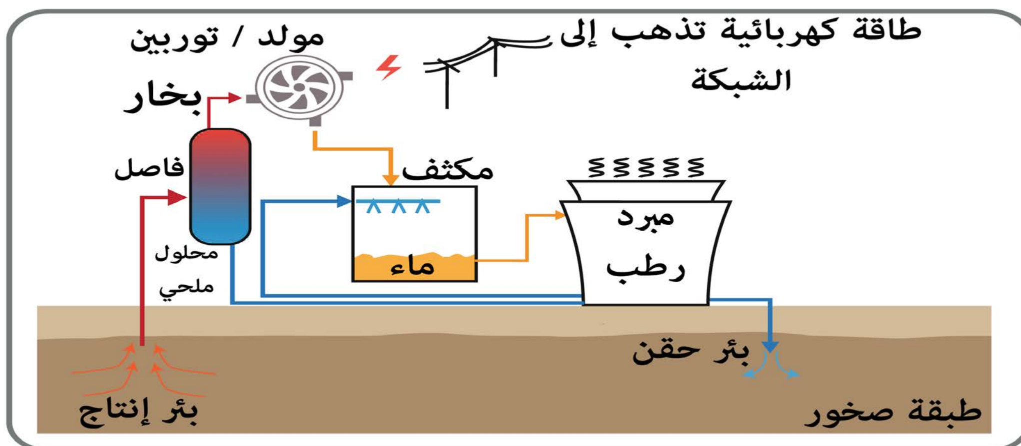
محطات توليد الطاقة الكهربائية بالبخار الجاف.

السوائل المستخدمة في هذه المحطات لها درجات حرارة أعلى من 250 درجة مئوية، ويبلغ متوسط حجم محطات البخار الجاف نحو 45 ميغاواط. بعد التمدد في التوربين، وإنتاج الطاقة الحركية التي تدفع المولد لإنتاج الكهرباء، يرسل البخار إلى مكثف ويجري تبريده عن طريق رش مياه التبريد (مبردات رطبة).

ثم يُخلط ماء التبريد والبخار المكثف وضخهما مباشرة إلى آبار الحقن. يُفقد بعد ذلك السائل الحراري الأرضي في محطات البخار الجاف جزئيّاً في الغلاف الجوي ويتكثف جزئيّاً ويعاد حقنه.

2. محطات البخار السريع

في أنظمة البخار السريع Flash Steam Systems، يتبخر السائل الناتج على السطح، بعد انخفاض الضغط، جزئيّاً فقط أو (سريع). في هذه الحالة، يتم فصل الطور السائل من البخار ويرسل إلى التوربين، في حين يعاد حقن السائل مرة أخرى في باطن الأرض مع السائل المكثف الذي جرى الحصول عليه من المبرد الرطب كما هو الحال في محطات البخار الجاف.



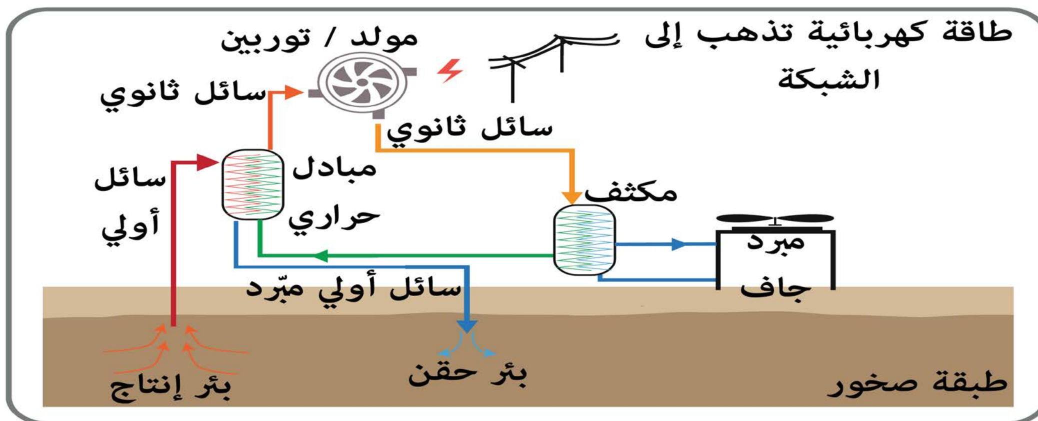
مخطط تفصيلي لمحطات البخار السريع.

تعيد محطات البخار السريع حقن معظم (60-90 %) من سائل الطاقة الحرارية الأرضية. اعتماداً على الحالة الديناميكية الحرارية للسوائل، قد يكون من الاقتصادي الحصول، عن طريق تغيرات الضغط، على البخار السريع مرة ثانية وأحياناً ثالثة من المائع المفصول، مما ينتج المزيد من البخار من غليانه. تستخدم تقنية بخار السريع عموماً سوائل ذات درجات حرارة أعلى من 180 درجة مئوية. يبلغ متوسط حجم المحطات 30 و37 و90 ميغاواط لتقنيات البخار السريع الفردي والثنائي والثلاثي، على التوالي.

3. محطات توليد الطاقة ذات الدورة الثنائية

جرى تطبيق تقنيات الدورة الثنائية Binary-cycle في الأصل لإنتاج الكهرباء من السوائل عند درجات حرارة منخفضة (منخفضة تصل إلى نحو 110 درجات مئوية).

في المحطات الثنائية، يتبادل السائل الحراري الأرضي الحرارة مع سائل عامل، وعادة ما يكون سائلاً عضويّاً بنقطة غليان منخفضة وضغط بخار مرتفع عند درجات حرارة منخفضة مقارنة ببخار الماء.



محطات توليد الطاقة ذات الدورة الثنائية.



هنا يبخّر سائل العمل في مبادل حراري، ويرسل إلى توربين تدفق محوري، وبعد ذلك يبرد ويكثّف، وتبدأ الدورة مرة أخرى. يعاد حقن المياه الأرضية بالكامل في الأرض.

تجذب تقنية الحلقة المغلقة هذه اهتماماً متزايداً؛ لأنها تضمن مرونة الإنتاج والحد الأدنى من تفاعل السوائل الأرضية مع البيئة السطحية. لكن العيب الرئيسي هو كفاءتها، أي النسبة بين صافي الكهرباء المنتجة ومدخلات الطاقة، وهي أقل من التقنيات الأخرى، حيث تبلغ نحو 12 % لمحطات البخار (البخار السريع والجاف) وتتراوح بين 2 و10 % (من 80-90 إلى 160-200 درجة مئوية) للأنظمة الثنائية.

حالياً، تبلغ الطاقة الإجمالية لإنتاج الطاقة العالمية 12.7 غيغاواط. تُستخدم محطات طاقة البخار السريع الأحادي الأكثر شيوعاً للطاقة الحرارية الأرضية، التي تشكل 41 % من السعة المركبة عالميّاً، ويتبع البخار الجاف بنسبة 22 % ويحتل البخار السريع الثنائي المرتبة الثالثة بنسبة 21 % من السعة المركبة عالميّاً.



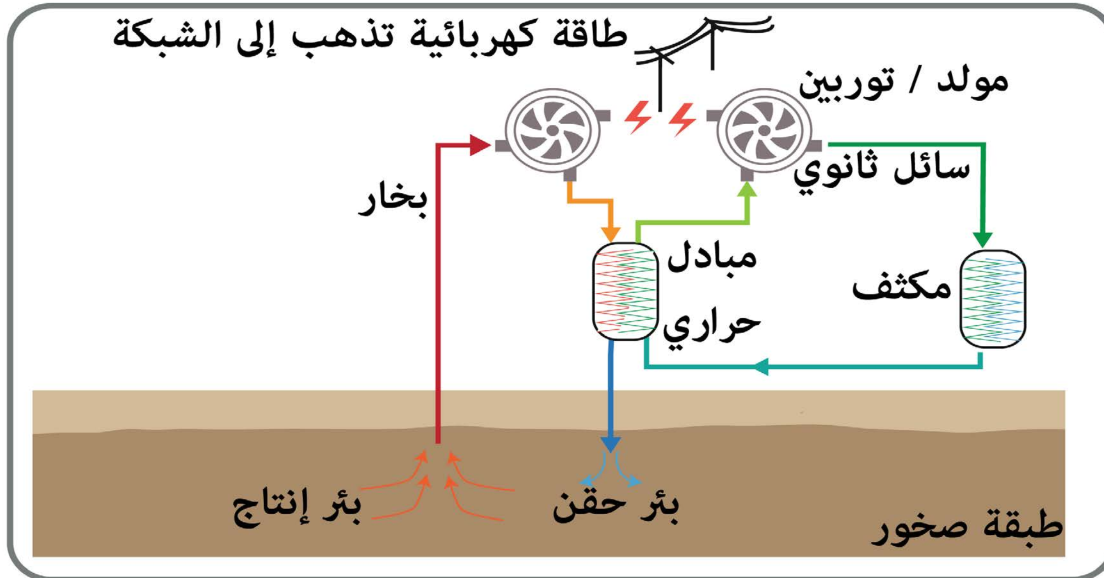
محطة واياراكي لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية، منطقة وايكاتو، نيوزيلندا. في الخلف الأيسر يوجد كتلتان رئيسيتان لمحطة الطاقة. يحوي الهيكل المرتفع الكبير في المقدمة على المراوح والأنابيب حيث يجري تبريد السائل العامل للمحطة الثنائية وتكثيفه بالهواء بدلاً من مياه النهر. يستخدم للمحطة الثنائية الماء / البخار الذي صار بارداً جدّاً لاستخدام الجيل الرئيسي، ولكن مع التكنولوجيا الحديثة لا يزال بإمكانه توليد الطاقة بمعدل أقل.

أخيراً، يشكل النظام الثنائي 12 % من السعة المركبة عالمياً. أما نسبة 3% المتبقية من محطات توليد الطاقة فهي عبارة عن وحدات البخار السريع الثلاثية، والبخار السريع / الهجين الثنائي، وتقنيات طاقة حرارية أخرى. بلغ التوليد السنوي للكهرباء 80.9 تيراواط ساعة في عام 2015 (أحدث البيانات)، وهو ما يمثل نحو 0.3 % من توليد الكهرباء في العالم.

4. محطـات توليـد الطاقـة الهجينـة

من أجل تحسين كفاءة الطاقة، تجمع بعض المصانع بين تقنيات مختلفة. على سبيل المثال، في معظم محطات البخار السريع، غالباً ما يخرج البخار من التوربين عند درجات حرارة مناسبة للاستخدامات الأخرى. تجمع بعض محطات توليد الطاقة بين تقنية البخار الجاف أو السريع مع الدورة الثنائية لإنتاج الكهرباء مما يمكن من تقليل الحرارة.

تجمع محطات الطاقة الهجينة بين النوع المستقل لمحطة الطاقة الحرارية الأرضية ومصدر حرارة مختلف، على سبيل المثال تركيز الطاقة الشمسية أو الكتلة الحيوية، لزيادة درجة حرارة السائل الحراري الأرضي، ومن ثم إنتاج المزيد من الطاقة.



محطة توليد الطاقة الهجينة.

يوجد طريقة أخرى مُهمَّة لتحسين الكفاءة وتحسين المظهر الاقتصادي لمشروعات الطاقة الحرارية الأرضية وهي استخدام التطبيقات المختلفة للإنتاج المشترك للطاقة والتدفئة و / أو التبريد (CCHP، التبريد المشترك، الحرارة والطاقة).

تنتج مشروعات مختلفة في أوروبا (على سبيل المثال في بافاريا، ألمانيا) وحول العالم كلاً من الحرارة لتدفئة المنطقة والطاقة، ومن المتوقع أن تزداد CCHP، بخاصة في أوروبا ومناطق أخرى ذات كثافة سكانية عالية.

طبقت أيضاً العملية المتسلسلة للحرارة الأرضية من خلال دمج التقنيات المختلفة التي تستخدم درجات حرارة منخفضة تدريجيّاً، والمعروفة باسم التطبيقات المتتالية، في أماكن مختلفة، ومن المتوقع أن يجري تطويرها بشكل أكبر في المستقبل القريب، لأنها تحسن كفاءة الطاقة وتوفر فوائد المجتمع المحلي.

الأمثلة النموذجية هي مزيج من محطات الطاقة أو تدفئة المناطق مع الصوبات الزراعية أو مشروعات تربية الأسماك، أو أيضاً مع العلاج المائي ومراكز العلاج، مثل بلو لاغون Blue Lagoon الشهيرة في أيسلندا.

حالياً، يسعى العالم جاهداً لتطوير أكبر قدر ممكن من الطاقة المتجددة لمواكبة الطلب المتزايد وتلبية المعايير البيئية. تتمثل إحدى طرائق كسب الدعم لمصادر الطاقة المتجددة في دمجها مع مصادر الطاقة التقليدية لإطالة عمر الموارد المستنفدة وإنشاء تطبيقات جديدة لمصادر الطاقة المتجددة في السوق الحالية.

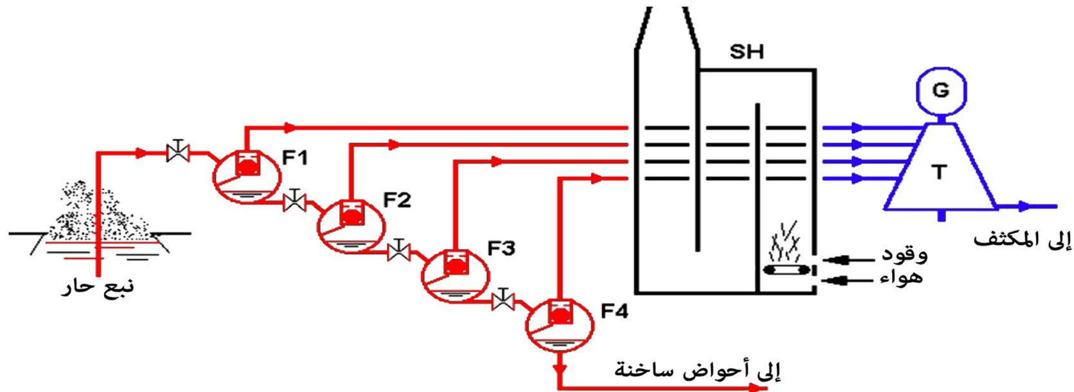
تجمع محطات توليد الطاقة الهجينة بين مصدرين مختلفين للطاقة في محطة واحدة لتحقيق كفاءات استخدام عامة أعلى من المحطات المنفصلة. تتمثل إحدى طرق القيام بذلك في الجمع بين مدخلات الطاقة الأحفورية

والطاقة الحرارية الأرضية بطريقة تؤدي إلى إنتاج محطة يتفوق في أدائه على أداء محطتين فرديتين وفق أحدث طراز، أحدهما يستخدم الوقود الأحفوري والآخر يستخدم الطاقة الحرارية الأرضية الخالصة.

أ. أنظمة التسخين الأحفوري

إن فكرة استخدام الوقود الأحفوري لتعزيز موارد الطاقة الحرارية الأرضية ليست فكرة جديدة. أبلغ في عام 1924 أن الفرنسي ب. كوفيرييه P. Caufourier قد اقترح نظام طاقة هجيناً يكون فيه الماء الساخن السريع من نبع حراري أرضي على التوالي لتوليد البخار، كما أن سخاناً فائقاً يعمل بالحرق الأحفوري من شأنه أن يرفع درجة حرارة البخار قبل قبوله في مجموعة متعددة التوربينات والضغط.

نظامه حالياً يمكن أن يسمى محطة بخار سريع ذات أربع مراحل مع تسخين أحفوري مفرط. ويلاحظ أنه استخدم محلول ملحي للنفايات في الحمامات العلاجية، مما يجعل هذه المحطة ليس هجينةً فقط وإنما متعددة الاستخدامات أيضاً.



محطة بخار سريع كوفرييه المكونة من 4 مراحل مع التسخين الأحفوري.

باستخدام افتراضات معقولة، أُجري تحليل ديناميكي حراري أظهر أن المحطة الهجينة كانت قادرةً على تقديم كفاءة عالية جدّاً في استخدام الموارد تصل إلى 65.3 %، وكان الجزء الأكبر من الناتج جاء من مساهمة الطاقة الحرارية الأرضية.

استخدم أحدهم سخاناً بسيطًا يعمل بالغاز الطبيعي لإضافة سخونة فائقة إلى البخار المشبع الذي تنتجه الآبار في The Geysers. الآخر استخدم توربينات غازية تعمل بالغاز الطبيعي مع سخان فائق لاستعادة حرارة العادم لتحقيق الهدف نفسه. من الواضح أن البديل الأخير أنتج قوة أكبر بكثير من الأول، وقد فعل ذلك في الواقع بطريقة تآزرية. سيكون للوقود الأحفوري المستخدم في The Geysers في هذه الخطة أعلى استخداماً من أي وقود أحفوري يحرق لتوليد الطاقة في كاليفورنيا.

كما وجد أن التسخين الفائق البسيط عن طريق الحرق المباشر للغاز الطبيعي غير اقتصادي مع أنه ينتج طاقة أكثر بنسبة 57 % من محطة البخار الجاف الأساسية.

ب. نظام التسخين الحراري المسبق

وجدنا سابقاً كيف يمكن استخدام الوقود الأحفوري لتحسين أداء محطات الطاقة الحرارية الأرضية. من الممكن أيضاً استخدام السوائل الجوفية لتحسين أداء محطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري. هذا هو بالضبط ما تفعله أنظمة التسخين الجيوحراري.

عثر على أحد أقدم الاقتراحات لهذا النوع من النظام في ورقة عام 1961 لهانسن. تكمن الفكرة في استخدام سائل الحرارة الجوفية الساخن كوسيط

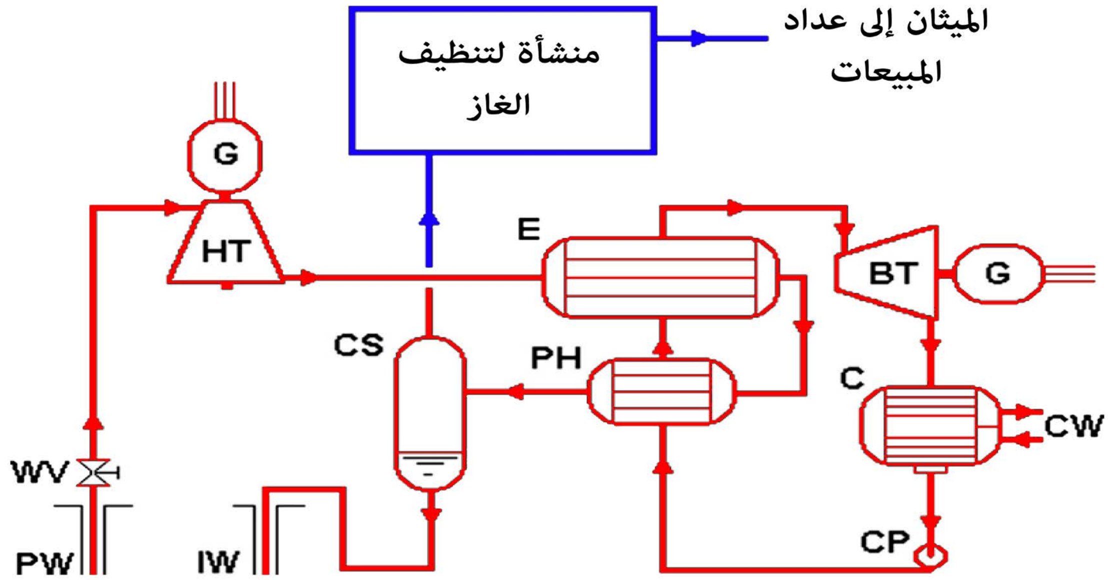
تسخين في سخانات المياه المغذية لمحطة توليد الطاقة التقليدية التي تعمل بالحرق الأحفوري، ومن ثم استبدال بعض بخار الاستخراج في دورة رانكين المتجددة. سيسمح هذا بتوليد المزيد من الطاقة في المحطة لأن البخار المستخرج سابقًا سيكون متاحاً حالياً للتدفق عبر التوربينات. إذا كان المائع الأرضي في حد ذاته منخفض الإمكانات للاستخدام في محطة بخار سريع، فإن هذا سيسمح باستخدامه بفعالية في النظام الهجين.

من الواضح أن مورد الطاقة الحرارية الأرضية يجب أن يقع بالقُرْب من موقع المحطة الأحفوري حتى يكون هذا المخطط الهجين عمليّاً. أجرت مدينة بوربانك بكاليفورنيا مسحًا للمواقع المحتملة لمثل هذا المحطة وخلصت إلى أن النبع الحار روزفلت، يوتا، ستكون موقعاً قابلاً للتطبيق اقتصاديًا. توجد حقول فحم قريبة يمكن أن تدعم محطةً ومنجماً حيث يمكن للمياه الساخنة الجوفية أن تخفف حمل تسخين مياه التغذية. أكدت دراسة التحقق من التصميم الهندسي المزايا التآزرية للمحطة.

ت. الأنظمة الهجينة الحرارية الأرضية ذات الضغط الجيولوجي

على طول الشاطئ الشمالي لخليج المكسيك، يوجد مصدر طاقة فعَّال يسمى (الضغط الجيولوجي) Geopressure. واجهت عمليات التنقيب عن النفط والغاز في المناطق الساحلية في لويزيانا وتكساس سوائل ذات ضغوط أكبر من الضغط الهيدروستاتيكي وتقترب من الصخور الصخرية. حيث يزداد الضغط الهيدروستاتيكي مع العمق بما يتناسب مع وزن الماء، أي نحو 0.465 رطل / بوصة 2 لكل قدم. ومع ذلك في التكوينات التي يؤدي فيها السائل دوراً داعماً

في الحفاظ على هيكل الخزان، فإن وزن الطبقة الصلبة يزيد من التدرج إلى القيمة الصخرية 1.0 lbf / in2 لكل قدم.



مخطط لمحطة هجينة يستخدم مورداً حراري أرضي ذا ضغط جيولوجي.

في خزانات الخليج ذات الضغط الجيولوجي، اختبر ضغط مرتفع بما يكفي للتسبب في وقف التنقيب عن النفط والغاز. مع تقنيات الحفر المحسنة، يمكن حالياً حفر هذه المناطق بأمان.

إلى جانب الضغط المرتفع جدّاً، تكون هذه السوائل ساخنة أيضاً وتحوي على غاز الميثان المذاب وغازات أخرى. يمكن لمحطة الطاقة الحرارية الأرضية المصممة بذكاء استخدام كل من مصادر الطاقة هذه للاستفادة منها.

لأنه أولاً، يمارس السائل عالي الضغط ضغطاً خلفيّاً توربينيّاً هيدروليكيّاً لتوليد الكهرباء. بعد ذلك يتدفق من خلال المبادلات الحرارية لدورة ثنائية، مما



يولد المزيد من الكهرباء. أخيراً يدخل في الفاصل حيث تتحرر الغازات المذابة. تستمر الغازات في منشأة تنظيف تشمل أجهزة تنقية الغاز وموصلات لتنقية غاز الميثان للبيع. يتم إعادة حقن محلول ملحي من الفاصل للمساعدة في منع الهبوط الذي قد يكون أكثر خطورة لهذا النوع من النظام من محطة تقليدية مائية حرارية.

قامت وزارة الطاقة الأمريكية ببناء وتشغيل محطة تجريبية صغيرة بالقُرّب من بليزانت بايو، تكساس. تم تصنيف المحطة عند 1 ميغاوات وعمل لمدة عام واحد في عام 1989–1990. بدلاً من بيع غاز الميثان، أحرقته المحطة في الموقع لتشغيل توربين غازي صغير. احتوت المحطة على مولد طاقة ثنائي الدورة، ولكن لا يمكن الحصول على توربينات هيدروليكية لتلائم ظروف المحلول الملحي. قد يؤدي التوربين الهيدروليكي المناسب إلى زيادة الإنتاج بنحو 7 - 8 %.

تتحول جدوى محطات الطاقة الحرارية الأرضية المضغوطة بقوة إلى خصائص المورد: يجب أن يكون الضغط مرتفعًا بدرجة كافية، والسائل ساخن بدرجة كافية، والأهم من ذلك من وجهة النظر الاقتصادية، يجب أن يكون هناك كمية كافية من الميثان المذاب. تعتمد قابلية ذوبان الميثان في المحاليل المائية على الضغط ودرجة الحرارة والملوحة.

من الواضح أن القابلية للذوبان تزداد مع الضغط، ولكن عند الضغوط المتوقعة في الخزانات المضغوطة، فإن اعتماد الذوبان على درجة الحرارة يظهر ما بين 71 – 93 درجة مئوية كحد أدنى. علاوة على ذلك، إذا كان السائل ممعدناً (فيه معادن كثيرة) بشكل كبير، كما هو متوقع لهذه المحاليل الملحية، تقل قابلية الذوبان مع زيادة الملوحة. على سبيل المثال، عند 121 درجة مئوية،

تقل قابلية ذوبان الميثان 3-4 % لكل 10000 جزء في المليون من إجمالي المواد الصلبة الذائبة. أخيرًا، يقلل وجود غازات أخرى غير قابلة للتكثيف من قابلية ذوبان الميثان.

ومن ثم، يجب أن تكون الظروف مواتية بشكل خاصٍّ لمورد مضغوط ليكون مجديًا تجاريّاً، وحتى الوقت الحالي لم يعثر على هذه الظروف. ومع ذلك، هناك موارد مضغوطة في العديد من البلدان ويواصل الباحثون استكشافها.

أخيراً، خلصت دراسة حديثة أجراها الباحث غريغس Griggs من جامعة ولاية لويزيانا إلى أن موارد الطاقة الحرارية الأرضية المضغوطة يمكن أن تكون مجدية اقتصاديًا مع المجموعة الصحيحة من الغاز الطبيعي وأسعار الكهرباء، ولكن على المدى القريب من غير المحتمل أن تحدث هذه الظروف.

وفي الوقت نفسه، هناك حاجة إلى مزيد من العمل في توصيف الموارد، في تحسين مرفق الطاقة بما في ذلك إيجاد دورات ثنائية أكثر كفاءة، وإجراء تحليلات اقتصادية مفصلة، وتوضيح القضايا القانونية والسياسية بما في ذلك ملكية حقوق المعادن الجوفية.

• الحدود التكنولوجية ووجهات النظر المستقبلية

اليوم تبلغ القدرة العالمية المركبة للطاقة الحرارية الأرضية نحو 60 غيغاواط في جميع أنحاء العالم مع حصص تبلغ 18 و26 و56 % لتوليد الطاقة والتطبيقات الحرارية ومضخات الحرارة الأرضية (GSHP)، على التوالي.

الأسواق الرئيسية للطاقة الحرارية الأرضية موجودة في أمريكا وأوروبا وآسيا. ومع ذلك، فإن هذا لا يشكل سوى جزء ضئيل من إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية، كما هو مقدّر في العديد من البلدان.

للحصول على نشر كامل ومسؤول لإمكانات الطاقة الحرارية الأرضية، يجب تحسين التقنيات وتطوير تقنيات جديدة من أجل تقليل التكاليف وزيادة أداء مشروعات الطاقة الحرارية الأرضية.

ومن ثم، يركز البحث والابتكار على تحسين التقنيات لتحسين استخراج الحرارة من باطن الأرض وزيادة إنتاج الطاقة، مع تقليل مخاطر الحفر دون الوصول إلى موارد الطاقة الحرارية الأرضية الصالحة تجاريّاً.

نظراً لأن معظم إمكانات الطاقة الحرارية الأرضية عبارة عن حرارة مخزنة في الصخور التي لا تسمح نفاذية المياه بالتدفق خلالها لإنتاج الماء الساخن، تهدف العديد من المشروعات إلى التغلب على هذا القيد. ويمكن تحقيق ذلك من خلال تحسين النفاذية عن طريق توسيع أو إعادة فتح الكسور الطبيعية بين آبار الإنتاج والحقن، عادةً من خلال التحفيز الهيدروليكي والكيميائي، أي ضخ المياه والمواد المضافة الكيميائية، وكذلك إدخال مواد خاصة تسمى الدعائم لمنع هذه الكسور من الانغلاق مرة أخرى عند ينخفض ضغط الحقن.

هذا النهج، الذي يتطلب مزيداً من التطوير التكنولوجي ليصير منتجاً اقتصاديّاً، من شأنه أن يزيد من حصة الطاقة الحرارية الأرضية المستخدمة بشكل كبير. تُعرف هذه التقنية باسم EGS (أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المحسنة أو المهندسة) أو Petro-Thermal (في بعض البلدان الأوروبية)، وتتطلب التحقق من الصحة والنشر، وخفض التكاليف، والأداء الأفضل.

في حين أن تحقيق توليد الكهرباء بتكلفة تنافسية من الخدمات البيئية والاجتماعية هو هدف طويل الأجل، فإن المشروعات البحثية والتوضيحية على المدى القصير ستنقل الصناعة على طول منحنى التعلم نحو الاستعداد التكنولوجي.



بمجرد التغلب على التحديات التقنية والاقتصادية التي تواجهها النظم البيئية والاجتماعية، أو عندما تتوافر طرائق أخرى لاستغلال موارد الصخور الساخنة (على سبيل المثال دون كسر الصخور الأساسية تحت الأرض)، يمكن متابعة نشر الطاقة الحرارية الأرضية حيثما كانت درجات حرارة الصخور وخصائص أخرى تحت الأرض توفر الطاقة عند مستوى منخفض بدرجة كافية من التكلفة. وهذا يعني أنه يمكن نشر أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المتقدمة حيثما كان هناك طلب على الكهرباء والتدفئة.

هدف مُهمٌّ آخر للبحث والابتكار في مجال الطاقة الحرارية الأرضية هو تطوير تخزين الطاقة الحرارية تحت الأرض. من خلال هذه التقنية، يمكن استرداد الحرارة التي يتم التقاطها وتخزينها في الخزانات الحرارية في الصيف بكفاءة في الشتاء.

يتجاوز مفهوم تخزين الطاقة الحرارية تحت الأرض (UTES) الطاقة الحرارية الأرضية ويأخذ في الاعتبار-على سبيل المثال- تخزين الطاقة الحرارية التي تنتجها المصادر الشمسية أو الحرارة المهدورة من العمليات الصناعية.

تزداد كفاءة تخزين الحرارة مع زيادة الحجم؛ ومن ثم، فإن هذه الميزة هي الأكثر أهمية في أنظمة التدفئة التجارية أو المحلية. هذا المفهوم، المستخدم حتى الوقت الحالي في الغالب على مستويات ضحلة، يجري توسيعه حالياً ليشمل طبقات المياه الأرضية العميقة والتخزين الحراري الكبير من أجل تحسين الاستجابة للطلب المتزايد على الحرارة الحرارية والنفايات.

عُرضت وجهات النظر المستقبلية من قِبَل وكالة الطاقة الدولية (2011). إذْ بحلول عام 2050 ستبلغ القدرة المركبة للطاقة الحرارية الأرضية العالمية المقدرة

200 غيغاواط، بما في ذلك 100 غيغاواط من قدرة الكهرباء الحرارية المائية و100 غيغاواط من الطاقة الكهربائية الحرارية.

من المفترض أن تصير هذه التقنية الأخيرة قابلة للتطبيق تجاريّاً بعد عام 2030 مباشرة. ومن المتوقع أن يمنع إنتاج الطاقة هذا نحو 760 ميغا طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون سنويّاً في جميع أنحاء العالم.

ومن المتوقع أن تحدث معظم هذه الزيادة في منطقة آسيا والمحيط الهادئ، وبخاصة إندونيسيا؛ والوادي المتصدع في شرق إفريقيا؛ وأمريكا الوسطى والجنوبية؛ وكذلك في الولايات المتحدة واليابان ونيوزيلندا وأيسلندا.

يبلغ المجموع العالمي المقدر للاستخدام السنوي للحرارة الأرضية بحلول عام 2050 5.8 إكساجول (نحو 1600 تيراواط ساعة من الطاقة الحرارية)، باستثناء الطاقة من مضخات الحرارة الأرضية وبافتراض الاستخدام الكامل لإمكانات توليد الطاقة الحرارية الأرضية عبر تقنية EGS.

في ظل هذه الظروف المفترضة، يجب أن يصير استخدام الحرارة من التكوينات الصخرية العميقة ممكناً نظريّاً حيثما تسمح درجات حرارة الصخور وخصائص باطن الأرض ببيع الطاقة بسعر منخفض بدرجة كافية. توجد أكبر احتمالية للحرارة الأرضية في المناطق ذات الطلب العالي على الحرارة: أوروبا، والصين، وأمريكا الشمالية.



مزايا وعيوب استخدام الطاقة الحرارية الأرضية

تتمتع الطاقة الحرارية الأرضية بإمكانات كبيرة لتزويد العديد من المناطق بالحرارة والكهرباء، ولها تأثير بيئي منخفض بشكل عامٍّ، ولكن المواقع التي يمكن استخدامها اقتصاديّاً محدودة.

سنتعرف فيما يأتي على أبرز عيوب ومزايا الطاقة الحرارية الأرضية.

• مزايا الطاقة الحرارية الأرضية

- يمكن استخدام الطاقة التي يجري الحصول عليها في أشكال مختلفة، مثل: إنتاج الكهرباء، وتدفئة المباني، وتسخين المياه في حمامات السباحة وفي مختلف الأعمال.
- إنها فعَّالة من حيث التكلفة باستثناء بناء محطة لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية.
- لا تشغل محطات الطاقة الحرارية الأرضية مساحة كبيرة، ومن ثم تساعد في الحماية.
- على عكس الطاقة الشمسية، فهي لا تعتمد على الظروف الجوية.
- تكلفة صيانة محطات الطاقة الحرارية الأرضية أقل بكثير.
- يمكن أن تعمل كوقود بديل لتقليل التلوث.
- إنها طاقة متجددة ولا يمكن استنفادها.
- لا يوجد هدر أو توليد منتجات ثانوية.
- إنها صديقة للبيئة نسبيّاً.
- إنها موثوقة ومستدامة.
- تنتج قوة ثابتة.
- بيئة طبيعية.

• عيـــوب الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة

- ✓ يمكن أن تهاجر انبعاثات غازات الدفيئة الموجودة تحت سطح الأرض فوق سطح الأرض مما يزيد من مستويات التلوث. يكون هذا الوضع في الغالب حول محطات الطاقة الحرارية الأرضية.
- ✓ إن إنشاء الخزانات الحرارية الأرضية أمر خاصٌّ بالموقع نظراً لاحتياجاته الخاصة. هذه المواقع في الغالب بعيدة عن المنطقة المأهولة.
- ✓ لتشغيل المضخة الحرارية الأرضية، هناك حاجة إلى طاقة الإدخال التي تؤدي إلى استهلاك المزيد من الطاقة.
- ✓ تحوي السوائل المسحوبة من أعماق الأرض على مزيج من الغازات، مثل: ثاني أكسيد الكربون، وكبريتيد الهيدروجين، والميثان، والأمونيا التي تسهم في الاحتباس الحراري وتسبب رائحة مزعجة.
- ✓ يحوي الماء الساخن الذي يجري الحصول عليه من مصادر الطاقة الحرارية الأرضية على آثار من الزئبق والزرنيخ والأنتيمون والبورون وما إلى ذلك، وهي مواد كيميائية سامة.
- ✓ الكفاءة الحرارية لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية منخفضة وتتراوح بين 10و23 %.
- ✓ قد يؤثر بناء محطات الطاقة الحرارية الأرضية في استقرار الأرض.
- ✓ يعتبر نقل الطاقة الحرارية الأرضية لمسافات طويلة مكلفاً وباهظاً.
- ✓ يعد إنشاء محطات الطاقة الحرارية الأرضية مكلفاً.
- ✓ يوجد تكاليف للتسخين الأولي لإنشاء أنظمة التدفئة والتبريد.



- ✓ يمكن أن يؤدي نظام الطاقة الحرارية الأرضية المحسن إلى حدوث زلازل كجزء من التكسير الهيدروليكي.
- ✓ قد تطلق بعض الغازات السامة الضارة التي يمكن أن تتسرب من خلال الثقوب المحفورة أثناء البناء.

مزايا	العيوب
طاقة صافية معتدلة وكفاءة عالية في المواقع التي يمكن الوصول إليها.	تكلفة عالية وكفاءة منخفضة باستثناء المواقع المركزة والتي يمكن الوصول إليها.
انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أقل من الوقود الأحفوري.	ندرة المواقع المناسبة
تكلفة منخفضة في مواقع مواتية.	الضوضاء وبعض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

جدول موجز يبين أنّ استخدام الطاقة الحرارية الأرضية لتدفئة الأماكن ولإنتاج الكهرباء أو الحرارة العالية للعمليات الصناعية له مزايا وعيوب.

الطاقـــة الحراريـــة الأرضيـــة والبيئـــة

كما هو الحال مع أي مشروع بناء، فإن تنمية موارد الطاقة الحرارية الأرضية لها آثار بيئية؛ ومع ذلك، فإن هذه التأثيرات، مقارنةً بالتأثيرات الناتجة عن مصادر الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري وحتى مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، تعتبر صغيرة وحميدة إلى حد ما. تشمل الآثار المحتملة التي تم استكشافها -والتي سنتكلم عنها بشكل مفصل لاحقاً- ما يأتي:

- الانبعاثات الغازية في الغلاف الجوي.
- استخدامات الأرض.
- انبعاثات المواد الصلبة على السطح والغلاف الجوي.
- استخدام المياه.
- التلوث سمعي.
- تغيير المناظر الطبيعية.
- هبوط الأرض.
- الزلازل المستحثة.
- اضطراب المظاهر الحرارية المائية السطحية الموجودة (الفوارات الحارة، الينابيع الساخنة،... إلخ).

يمكن تصنيف هذه التأثيرات البيئية، بناءً على درجة تأثيرها، إما على أنها مزايا بيئية وإما تحديات بيئية. التحديات البيئية هي تلك التي تنفرد بها بشكل أساسي في تطوير موارد الطاقة الحرارية الأرضية وتتكون أساساً من هبوط الأرض المحتمل، والزلازل المستحثة، والاضطراب المحتمل لخصائص الطاقة الحرارية الأرضية الطبيعية الحالية.



كما يعلم الجميع فقد برز قلق عالمي متزايد على مدى العقود الماضية بشأن زيادة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي - وأكبر مصادرها هي محطات الطاقة التي تعمل بالفحم.

تستند المخاوف بشأن ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي إلى خصائصه في احتجاز الحرارة، التي تعمل على تضخيم تأثير الاحتباس الحراري على الأرض، ومن ثم التأثير على المناخ العالمي. وفقاً لكل من الإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA) والإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (NASA)، كان عام 2015 هو العام الأكثر دفئاً على كوكب الأرض منذ بدء التسجيلات في عام 1880.

في الواقع، يعتبر الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ التابع للأمم المتحدة أن ارتفاع درجة حرارة المناخ العالمي أمر لا لبس فيه، ومن المحتمل جدّاً أن معظم الزيادة الملحوظة في متوسط درجات الحرارة العالمية منذ منتصف القرن العشرين ترجع إلى الزيادة الملحوظة في الأنشطة البشرية. تركيزات غازات الاحتباس الحراري، بخاصة في شكل ثاني أكسيد الكربون، وتشتمل أيضاً على الميثان (CH4) وأكاسيد النيتروز (NOx).

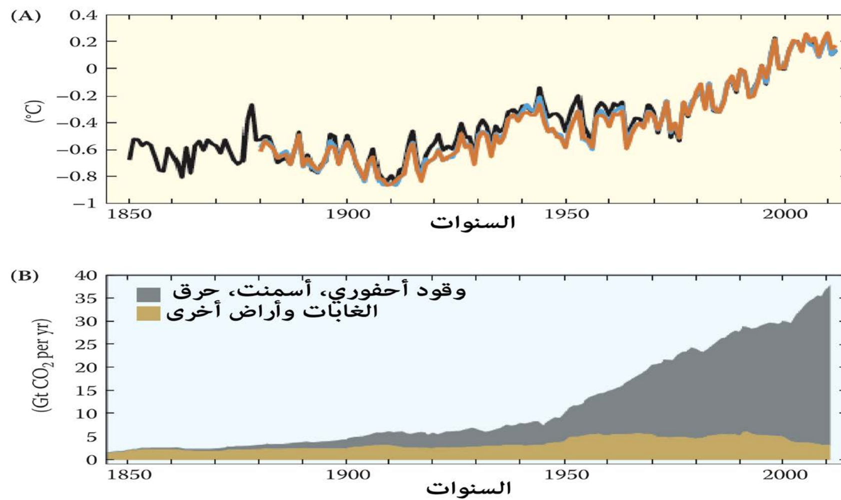
❖ الانبعاثات الغازية

الغازات الرئيسية المنتجة من محطات الطاقة الحرارية الأرضية الجافة والبخارية السريعة هي ثاني أكسيد الكربون، وكبريتيد الهيدروجين (H_2S)، وكميات صغيرة من أكاسيد النيتروز (NOx)، والأمونيا، وربما الزئبق (Hg). لا تصدر محطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية المبردة بالهواء أي غازات لأن حرارة مائع الطاقة الحرارية الأرضية فقط تنتقل إلى مائع العمل عبر مبادل حراري.



كل من السائل الجيوحراري والسائل العامل محصوران في حلقات مغلقة ولا توجد فتحات تهوية في الغلاف الجوي. مقارنة بمحطات الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري، فإن انبعاثات محطات الطاقة الحرارية الأرضية التي تعمل بالبخار الجاف أو المحمّص تمثل كمية صغيرة.

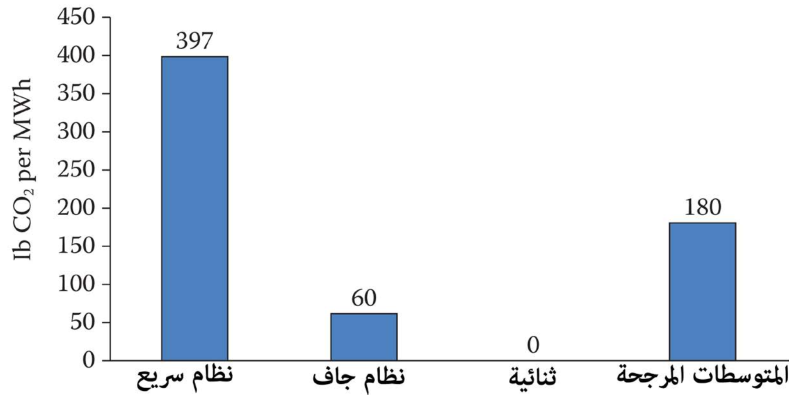
وفقًا لتقرير صادر عن جمعية الطاقة الحرارية الأرضية، فإن محطة توليد الطاقة التي تعمل بالفحم «تنبعث منها 24 ضعف ثاني أكسيد الكربون، و10837 مرة أكثر من ثاني أكسيد الكبريت، و3865 مرة أكثر من أكاسيد النيتروز لكل ميغاواط في الساعة من محطة بخار تعمل بالطاقة الحرارية الأرضية». تستند هذه الملاحظات إلى مقارنة الانبعاثات من منشآت إنتاج الطاقة البخارية الجافة في The Geysers مع محطة طاقة مماثلة تعمل بالفحم.



(A) متوسط شذوذ درجة حرارة سطح الأرض والمحيطات مجتمعة على المستوى العالمي مشار إليه بمتوسط الفترة من 1986 إلى 2005. تمثل الألوان المختلفة ثلاث مجموعات مختلفة من البيانات. (B) انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية المنشأ العالمية تقاس بالغيغاطن في السنة (GT / سنة). لاحظ الزيادة المفاجئة في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون منذ نحو عام 1950.

انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية ذات البخار السريع أعلى بشكل عامٍّ، ومع ذلك، يبلغ متوسطها نحو 400 رطل من ثاني أكسيد الكربون لكل ميغاواط في الساعة، مما ينتج عنه متوسط مرجح للبخار ومخرجات البخار السريع تبلغ نحو 180 رطلاً من ثاني أكسيد الكربون لكل ميغاواط ساعة.

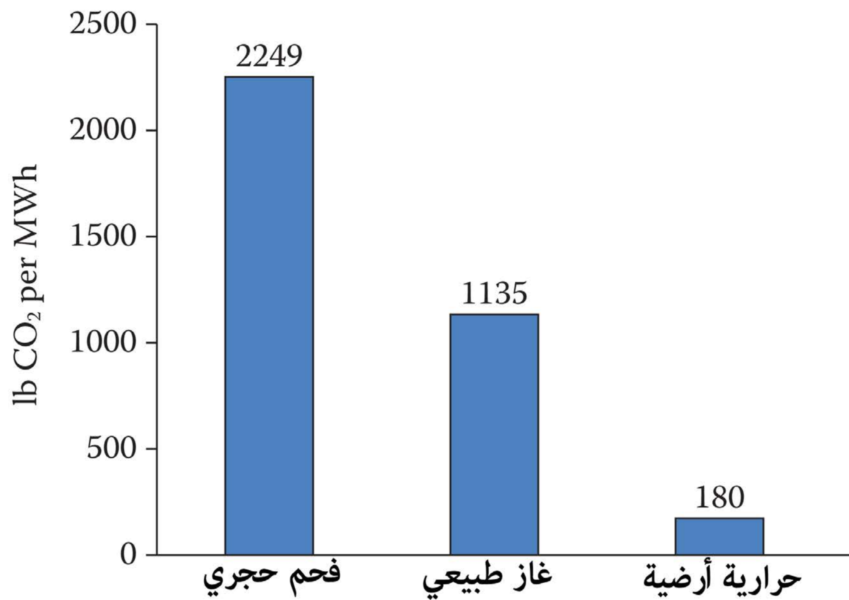
باستخدام المتوسط المرجح لانبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية البخارية والسريع، تنتج محطات البخار السريع والبخار أقل من عُشر انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من محطة طاقة تعمل بالفحم ذات الحجم المماثل.



متوسط انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الحرارية الأرضية من تقنيات التوليد المختلفة كما جرى تجميعها من منشآت كاليفورنيا في عام 2010.

إذا أُخذت الانبعاثات القريبة من الصفر لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية في الاعتبار، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية تكون أقل من 5 % من تلك المنبعثة من مصادر تعمل بالفحم ولها إنتاج الطاقة نفسه. تظهر جداول ورسوم بيانية مماثلة للغازات المنبعثة الأخرى المخرجات المنخفضة إلى المعدومة من عمليات الطاقة الحرارية الأرضية مقارنة بمحطات طاقة الوقود الأحفوري.

إذا أُخذت الانبعاثات القريبة من الصفر لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية في الاعتبار، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية تكون أقل من 5 % من تلك المنبعثة من مصادر تعمل بالفحم ولها إنتاج الطاقة نفسه. وتظهر جداول ورسوم بيانية مماثلة للغازات المنبعثة الأخرى المخرجات المنخفضة إلى المعدومة من عمليات الطاقة الحرارية الأرضية مقارنة بمنشآت طاقة الوقود الأحفوري.



مقارنة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من محطات الطاقة التي تعمل بالفحم والغاز الطبيعي والطاقة الحرارية الأرضية (البخار السريع والبخار فقط) لمنشآت كاليفورنيا. البيانات مأخوذة من مجلس موارد الهواء في كاليفورنيا، ووكالة حماية البيئة الأمريكية، ولجنة كاليفورنيا للطاقة، ورابطة الطاقة الحرارية الأرضية.

ثاني أكسيد الكربون وكبريتيد الهيدروجين (H_2S) هما أكثر الغازات غير القابلة للتكثيف شيوعاً (NCGs) المنتجة من بخار الطاقة الحرارية الأرضية، تليها كميات صغيرة من الأمونيا (NH_3)، والميثان (CH_4)، وأكاسيد النيتروز، والزئبق اعتماداً على الخصائص الجيولوجية للمناطق المتقدمة. نظام الطاقة الحرارية الأرضية.

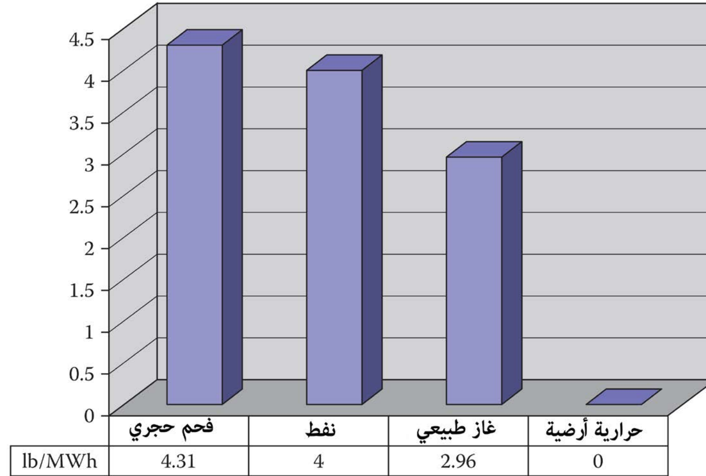
عادةً، تشكل الغازات غير القابلة للتكثيف نسبة قليلة من الوزن من البخار، ويمثل ثاني أكسيد الكربون عادةً ما يزيد على 90 % من مجموعات NCG.

في الوقت الحالي، ليس مطلوباً في الولايات المتحدة التقاط أو إزالة ثاني أكسيد الكربون، ولكن يجري تنظيم H_2S بشكل صارم بسبب رائحته الكريهة بتركيزات منخفضة (30 جزءاً في البليون) وسميته عند مستويات أعلى (< 500 جزء في البليون). من السهل نسبيّاً إزالة H_2S من خلال الأكسدة وفق المعادلة الآتية:



$$2H_2S + 3O_2 \rightarrow 2SO + 2H_2O_2$$

وإنتاج عنصر الكبريت الذي يمكن بيعه لصناعة الأسمدة. يحدث ذلك بشكل روتيني في محطات الطاقة في The Geysers.



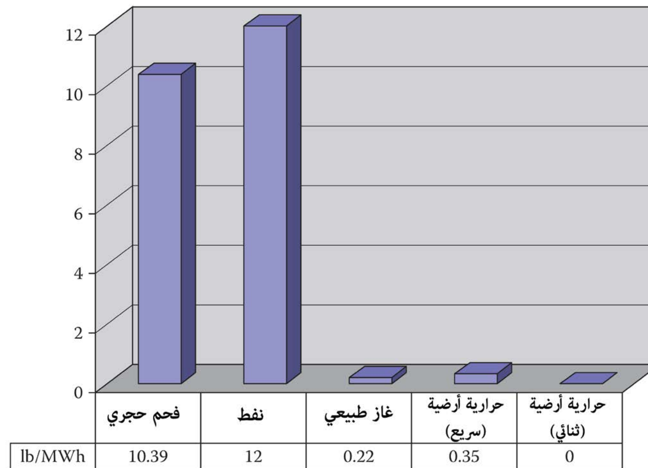
مقارنة انبعاثات أكاسيد النيتروجين من محطات توليد الطاقة المختلفة. القيم المبلغ عنها هي متوسط انبعاثات محطات الطاقة الحالية؛ وقد أبلغ عن الغاز الطبيعي كمتوسط لدورة البخار الحالية وتوربينات الغاز البسيطة وانبعاثات محطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة.

المناقشات جارية في جميع أنحاء العالم حول كيفية وقف ظاهرة الاحتباس الحراري، مثل وضع سقف الكربون لمحطات الطاقة أو فرض ضريبة على

انبعاثات الكربون. إذا فرضت قيود على محطات توليد الطاقة المنتجة للكربون، فستكون محطات الطاقة الحرارية الأرضية في وضع جيد للحفاظ على انخفاض تكاليف الطاقة.

علاوة على ذلك، إذا تم استخدام برنامج أرصدة انبعاثات الكربون، يمكن لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية أن تولد إيرادات إضافية عن طريق بيع أرصدة الكربون في سوق تجارية. يختلف تركيز ثاني أكسيد الكربون بشكل مباشر مع درجة حرارة الخزان. ويمكن التحكم في تركيز ثاني أكسيد الكربون عن طريق تفاعل كيميائي يتضمن معادن البريهنايت والكلنوزوايت والكالسيت والكوارتز بالإضافة إلى الماء، كما هو موضح أدناه:

بريهنيت + ثاني أكسيد الكربون، كلينوزويزيت + كالسيت + كوارتز + ماء



	فحم حجري	نفط	غاز طبيعي	حرارية أرضية (سريع)	حرارية أرضية (ثنائي)
lb/MWh	10.39	12	0.22	0.35	0

مقارنة انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت من محطات توليد الطاقة المختلفة. بالنسبة للطاقة الحرارية الأرضية، تعكس كمية ثاني أكسيد الكبريت تحويل غاز كبريتيد الهيدروجين عند دخوله الغلاف الجوي، حيث ينبعث القليل من ثاني أكسيد الكبريت مباشرة من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية. القيم المبلغ عنها هي متوسط انبعاثات محطات الطاقة الحالية؛ تم الإبلاغ عن الغاز الطبيعي كمتوسط لدورة البخار الحالية وتوربينات الغاز البسيطة وانبعاثات محطة توليد الطاقة ذات الدورة المركبة.

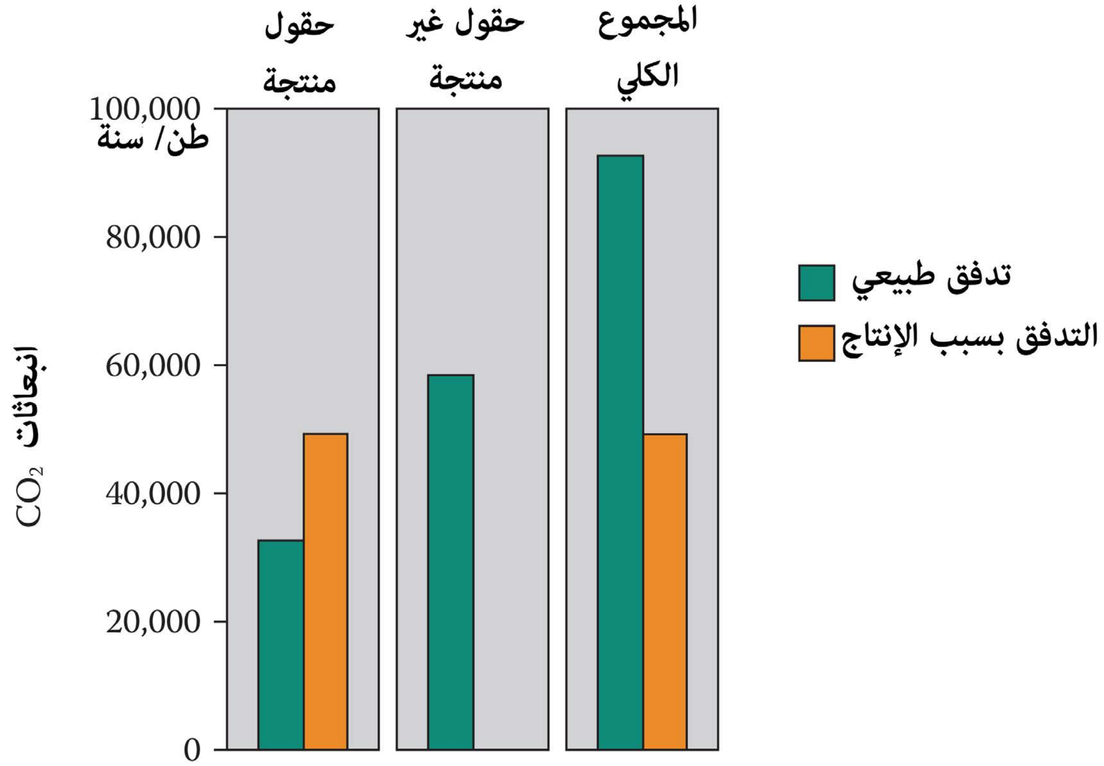


مع زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون مع زيادة درجة الحرارة، يتم توجيه التفاعل نحو اليمين (للحفاظ على التوازن، كما هو ملاحظ من قِبَل الأسهم المزدوجة المتعارضة) ويفضل تكوين الكلينوزوايت والكالسيت والكوارتز كمنتجات تغيير حراري مائي.

ومع ذلك، في نظام الحمل الحراري، حيث يدور السائل إلى مناطق أكثر برودة يحدث العكس، ويهرب ثاني أكسيد الكربون من السائل، ومن ثم يفضل تكوين البريهنايت عند مستويات أقل عمقاً وأكثر برودة في نظام الطاقة الحرارية الأرضية.

أخيراً، يمكن أن يؤثر تطوير أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية التي لها وجود سطحي على التدفق الطبيعي لثاني أكسيد الكربون. من الدراسات التي أجريت في أيسلندا، فإن تدفق ثاني أكسيد الكربون من الحقول المنتجة يتجاوز التدفق الطبيعي. ربما يرجع ذلك إلى معدلات التدفق المتسارعة التي توفرها آبار الإنتاج وما يقابلها من انخفاض في معدلات التدفق الطبيعي.

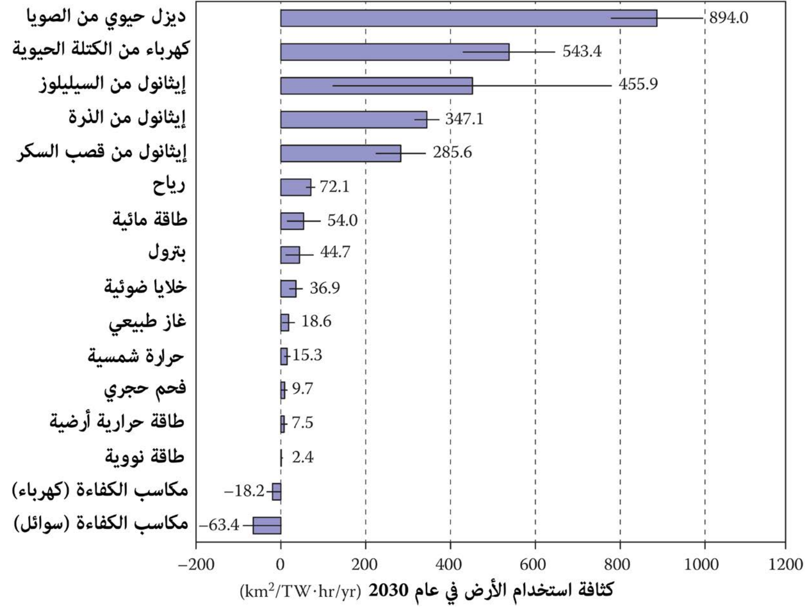
ومع ذلك، فإن انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الطبيعية من الحقول غير المنتجة للطاقة الحرارية الأرضية والتي لها مظاهر سطحية، مثل: الينابيع الساخنة، والفومارول، والفوارات الحارة، هي في الواقع أعلى من الحقول المنتجة. يشير الجمع بين مجموعتي البيانات إلى أن التدفق الطبيعي لثاني أكسيد الكربون يبلغ نحو ضعف التدفق الناتج عن محطات الطاقة الحرارية الأرضية.



انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المنتجة وغير المنتجة في أيسلندا.

• استخـــدام الأراضـــي

بالمقارنة مع مصادر الطاقة الأخرى القائمة على الوقود الأحفوري وحتى مصادر الطاقة المتجددة الأخرى (الرياح، والطاقة الشمسية، والطاقة المائية، والكتلة الحيوية)، فإن الطاقة الحرارية الأرضية لها ثاني أدنى بصمة كربونية (Carbon Footprint) بعد الطاقة النووية، والبصمة الكربونية مؤشر يقيس معدلات انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون على مختلف المستويات، مثل: الأفراد أو المصانع أو المنتجات أو حتى الدول.



كثافة استخدام الأراضي لإنتاج الطاقة لتقنيات التحويل المختلفة المحسوبة حتى عام 2030. توضح أشرطة الخطأ التقديرات الأكثر والأقل إحكاماً لكثافة استخدام الأراضي الحالية والمستقبلية المعقولة. القيم المعروضة هي نقطة المنتصف للتقديرات الأكثر والأقل إحكاماً. علماً أن قيم الفحم والطاقة النووية تستثني منطقة المناجم لتزويد المحطات بالوقود.

تمتلك محطة الطاقة النووية أصغر بصمة للطاقة المنتجة؛ ومع ذلك، إذا كنت تفكر في منطقة مناجم اليورانيوم التي تزود المحطات النووية بالوقود، فإن الطاقة الحرارية الأرضية سيكون لها في الواقع أصغر بصمة بين جميع تقنيات تحويل الطاقة.

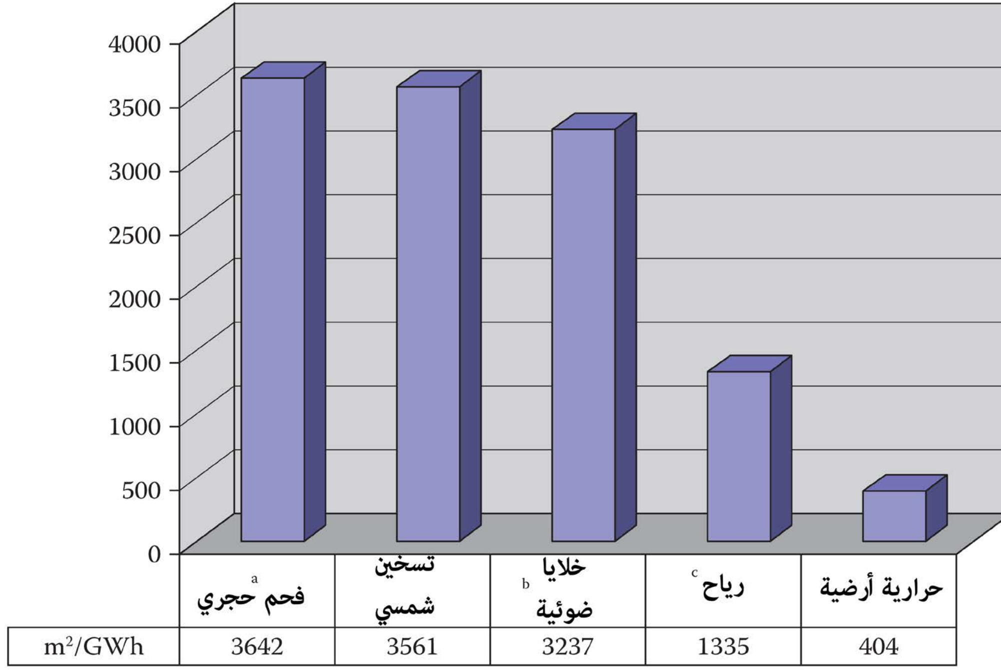
توضح مقارنات استخدام الأراضي لمحطات الطاقة التي تعمل بالفحم والمصادر المتجددة لطاقة الرياح والطاقة الشمسية أيضاً الأثر الصغير للطاقة الحرارية الأرضية. تعتمد المساحة الفعلية المطلوبة لمحطة الطاقة الحرارية الأرضية على حجم محطة الطاقة وحجم حقل البئر الداعم (كل من الإنتاج والحقن) وطرائق الوصول وخطوط الأنابيب والمحطات الفرعية والمباني المساعدة.

يمثل حقل البئر عادةً أكبر مساحة، في حدود 5 إلى 10 كيلومترات مربعة لمحطة 20 إلى 50 ميغاواط. ومع ذلك، فإن منصات الآبار نفسها عادة ما تستهلك نحو 2 % فقط من 5 إلى 10 كيلومترات مربعة، وهي كمية يمكن تقليلها أكثر إذا جرى استخدام الحفر الموجه، مما يسمح بحفر بئرين أو أكثر على وسادة معينة.

بشكل عامٍّ، يستخدم البخار السريع الحراري الأرضي أو المحطة الثنائية (لكل غيغاواط ساعة) نحو 11 % من المساحة المطلوبة لمحطة الطاقة الشمسية الحرارية و12 % من تلك لمزرعة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV).

في حين تتطلب محطة الفحم، بما في ذلك 30 عاماً من التعدين الشريطي، 30 إلى 35 ضعف مساحة السطح اللازمة لمحطة البخار السريع أو ثنائية الدورة على أساس لكل ميغاواط كهربائية أو ميغاواط ساعة.

من بين محطات الطاقة الحرارية الأرضية، تتطلب تلك المحاليل الملحية شديدة الملوحة، مثل تلك الموجودة في حقل الطاقة الحرارية الأرضية لبحر سالتون، مساحة أكبر بنسبة 75 % من محطات البخار السريع أو المحطات الثنائية البسيطة، نظراً لمرافق المعالجة الكيميائية الإضافية (وحدة التبلور الومضية والمفاعل أو FCRC) لجعل المحاليل الملحية قابلة للإدارة لإنتاج الطاقة.



	فحم حجري[a]	تسخين شمسي	خلايا ضوئية[b]	رياح[c]	حرارية أرضية
m^2/GWh	3642	3561	3237	1335	404

(a) تشمل التعدين.
(b) يفترض مشروع الطاقة الكهروضوئية للمحطة المركزية، وليس الأنظمة الكهروضوئية على الأسطح.
(c) الأراضي المشغولة فعلياً بوساطة التوربينات وطرائق الخدمة.

مساحة الأرض المستخدمة لكل غيغاواط ساعة (GWh) للفحم، والحرارة الشمسية، والطاقة الشمسية الكهروضوئية، وطاقة الرياح، والطاقة الحرارية الأرضية.

تتوافق خطوط الأنابيب التي تنقل السوائل الأرضية من الآبار إلى محطة توليد الكهرباء مع العديد من استخدامات الأرض الأخرى. عادةً ما ترتكز على دعامات يبلغ متوسط ارتفاعها من متر واحد إلى مترين فوق سطح الأرض وتتضمن حلقات تمدد رأسية وأفقية. تسمح الحلقات الرأسية في الأنابيب (لاستيعاب التمدد) بالوصول إلى أجزاء مختلفة من الحقل للمركبات أو الماشية.





رعي الماشية في حقل الآبار الحرارية الأرضية ميرافاليس Miravalles، في كوستاريكا. يجري دعم خطوط الأنابيب البخارية بوساطة دعامات تسمح لخطوط الأنابيب بالانزلاق في حالة حدوث زلزال وتسمح بالوصول للماشية للرعي داخل حقل البئر.

تتوافق حقول الآبار الأرضية أيضًا مع الزراعة، كما هو الحال في بحر سالتون / وادي إمبريال في جنوب شرق كاليفورنيا. يدعم حقل واياراكي للطاقة الحرارية الأرضية في نيوزيلندا تربية المواشي وتربية الجمبري، ويستمتع السكان المحليون والسائحون بالنقع والاسترخاء في البحيرة الزرقاء الشهيرة في محطة سفارتسينغي Svartsengi للطاقة الحرارية الأرضية في أيسلندا.





تدعم النفايات السائلة من محطة سفارتسينغي لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية، الموضحة في الخلفية، البحيرة الزرقاء الشهيرة في أيسلندا حيث يمكن للزوار أن يسترخوا في المياه العلاجية الأرضية ذات السمعة الطيبة.

في حقل الطاقة الحرارية الأرضية ينابيع ستيمبوت Steamboat Springs المنتج، بالقُرْب من رينو، نيفادا، يمر طريق سريع رئيسي عبر الحقل، وتقع محطات الطاقة على كلا الجانبين. لا توجد أي تقنية أخرى لتحويل الطاقة، بما في ذلك الأنواع الأخرى من توليد الطاقة المتجددة، تتيح مثل هذه المجموعة المتنوعة من الاستخدامات المتعددة المحتملة للأرض في سياق توليد الطاقة.





تقع الأراضي الزراعية على حدود محطة أورمات -92ميغا وي هيبر2- للطاقة الحرارية الأرضية في إمبريال فالي، كاليفورنيا. تظهر أبراج التبريد بالمياه في المسافة المتوسطة التي تحيط بأرض المحاصيل.

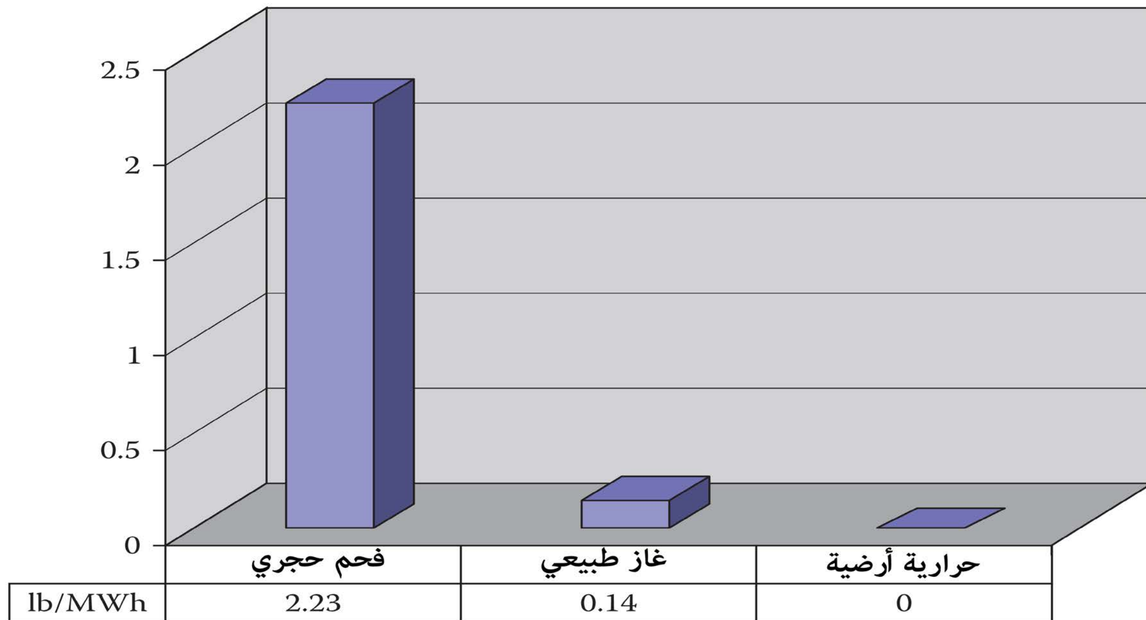
أخيراً، تجدر الإشارة إلى أن تبريد الهواء للعديد من محطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية يتطلب مساحة أكبر من التبخر المبرد بالماء المستخدم في معظم محطات البخار السريع. هذا بسبب تبريد الماء وخصائص رفض الحرارة الأفضل مقارنة بالهواء.



منظر موجه إلى الشمال الشرقي عبر حقل ستيمبوت للطاقة الحرارية الأرضية، بالقُرْب من رينو، نيفادا. يشير السهم الأصفر إلى طريق سريع جرى تشييده حديثاً يمر عبر الحقل. يشير السهم الأحمر إلى محطة توليد الطاقة Galena-3، وهي واحدة من ست محطات لتوليد الطاقة تعمل على تطوير مجال الطاقة الحرارية الأرضية.

على سبيل المثال، تغطي أبراج التبريد بالمياه في محطة البخار السريع 92-MWe Heber 2 في إمبريال فالي بولاية كاليفورنيا نحو 5 % من مساحة الأرض للمحطة وتتطلب نحو 61 متراً مربعاً / ميغاواط، في حين أن المكثفات المبردة بالهواء في 26 - تشغل محطة MWe Galena 3 نحو 31.5% من مساحة محطة الطاقة وتتطلب نحو 209 م 2 / ميغاواط كهربائي.





رسم بياني يوضح مقارنة الجسيمات الخاصة بالفحم والغاز الطبيعي والطاقة الحرارية الأرضية. القيم الرسومية هي لمراجل الفحم المسحوق، والغاز الطبيعي ذي الدورة المركبة، ومتوسط محطات الطاقة الحرارية الأرضية الموجودة.

• تصريف المواد الصلبة في الهواء والأرض

يعتبر تصريف الجسيمات في الهواء من عمليات الطاقة الحرارية الأرضية ضئيلًا، بخاصة بالمقارنة مع محطات الطاقة التي تعمل بالفحم. كما أن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والنووية ليس لها انبعاثات جسيمية في الغلاف الجوي.

لا يمثل تصريف المواد الصلبة على السطح مشكلة في معظم أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية؛ إذ تبقى المواد الصلبة ذائبة في المحلول، ثم يعاد حقنها في



الأرض بعد استخدامها لإعادة شحن الخزان الحراري الأرضي ومنع التلوث السطحي المحتمل.

الاستثناء الرئيسي لهذا هو المحاليل الملحية شديدة الملوحة في حقل بحر سالتون الحراري الأرضي في جنوب كاليفورنيا، التي تحوي على أكثر من 200000 جزء في المليون من المواد الصلبة الذائبة (للمقارنة، يحوي متوسط مياه البحر على نحو 33000 جزء في المليون من الأملاح الذائبة).

نظراً للطبيعة المسببة للتآكل والانسداد المحتمل لهذه السوائل، فقد استغرق الأمر سنوات عديدة من البحث لإدارة المحاليل الملحية عالية الملوحة بنجاح لإنتاج الطاقة وتجنب تلوث السطح. تتضمن الطريقة الرئيسية المستخدمة حالياً عملية مصفاة البخار السريع/ مصفاة مفاعل، حيث يجري إدخال جزيئات البذور التي تترسب فيها المواد الصلبة مفرطة التشبع.

يمكن أن يؤدي ترسيب المواد المذابة على جزيئات البذور واستقرارها في قاع وعاء المفاعل إلى تقليل تحجيم المحلول الملحي على جوانب الأنابيب بشكل كبير. المحاليل الملحية المترسبة غنية بالمنغنيز (Mn) والزنك (Zn) والليثيوم (Li).

تتمثل الخطة طويلة الأجل في إرسال المحاليل الملحية المترسبة إلى منشأة مجاورة لاستعادة المعادن، التي توفر تدفقاً إضافيّاً محتملاً للإيرادات لمحطة الطاقة الحرارية الأرضية. بسبب هذه التقنيات المبتكرة لمعالجة المحاليل الملحية شديدة الملوحة، قد تتفوق منطقة إمبريال فالي في جنوب كاليفورنيا على الفوارات الحارة في شمال كاليفورنيا كأكبر مزود للطاقة الحرارية الأرضية في الولايات المتحدة. في السنوات الخمس إلى السبع المقبلة، يمكن أن تصير أيضاً منتجاً مُهمّاً لليثيوم لسوق البطاريات المتنامي.

• استخدام المياه

تستخدم المياه في تطوير وتشغيل منشآت الطاقة الحرارية الأرضية. عادة، من السهل تلبية متطلبات استخدام المياه لعمليات الطاقة الحرارية الأرضية وهي ثانوية نسبيّاً مقارنة -على سبيل المثال- بمحطة طاقة نووية.

النشاطان الرئيسيان اللذان يستخدمان الماء هما حفر الآبار أثناء التطوير وتقليل الحرارة المهدورة إذا جرى استخدام تبريد المياه لتكثيف عادم بخار التوربينات. يستخدم الماء في الحفر لتبريد ريشة الحفر، ودفع فتتات الحفر إلى أعلى الحفرة، والحفاظ على السلامة الهيكلية للبئر حتى يتم تدعيم جدار البئر بأنابيب الحفر.

يُخلط الماء بالفعل مع المعادن (على سبيل المثال، الباريت، وهو معدن عالي الكثافة) والمواد الكيميائية لصنع طين حفر يعاد تدويره أثناء الحفر. نظراً لإعادة تدوير الطين، لا يلزم سوى كمية صغيرة من ماء البنية للتعويض عن التبخر أثناء تبريد الطين قبل إعادة استخدامه.

الاستخدام الرئيسي للمياه هو تقليل الحرارة لتعزيز تكثيف بخار عادم التوربينات من خلال أبراج التبريد بالماء التبخيري. أثناء التبريد بالتبخير، يُفقد عادةً أكثر من 50 % من مكثف البخار ومياه التبريد المضافة إلى الغلاف الجوي في أبراج التبريد. ومن ثم، فإن المياه العذبة مطلوبة لتعويض الفرق، الذي يمكن أن يضغط على السطح المحلي وإمدادات المياه الأرضية الضحلة في المناطق القاحلة. على سبيل المثال، كانت منشأة كوزو الحرارية الأرضية في شرق كاليفورنيا، التي تبلغ سعتها المركبة 270 ميغاواط، تعاني من انخفاض في إنتاجية المكمن لأن كتلة السائل المحقون كانت نحو نصف الكتلة المنتجة بسبب



الخسائر في أبراج التبريد التبخيري.

لتقليل الانخفاض والمساعدة في استقرار ضغط الخزان، جرى إنشاء خط أنابيب مياه بطول 9 أميال يوفر ما يصل إلى 4500 غالون في الدقيقة من الماء لإعادة الحقن. قبل القيام بذلك، جرى إعداد تقارير التأثير البيئي لكل من الوكالات الفيدرالية والمحلية لإثبات أن المشروع لن يؤثر سلباً في توافر المياه لمربي الماشية المحليين في هذه المنطقة القاحلة.

لا حاجة لمياه البنية للمكثفات المبردة بالهواء، كما هو الحال مع معظم محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية. في هذا السيناريو، يعتبر استخدام المياه لتشغيل المحطة هو الأدنى بالنسبة لجميع منتجي طاقة الحمل الأساسي، التي تتكون من محطات الوقود الأحفوري والنووية والطاقة الكهرومائية. ومع ذلك، فإن المكثفات المبردة بالهواء، كما هو مذكور أعلاه، تشغل مساحة أكبر نتيجة لانخفاض خصائص نقل الحرارة للهواء مقارنة بالماء.

علاوة على ذلك، تحوي المكثفات المبردة بالهواء على حمولة طفيلية أعلى ناتجة عن استخدام مراوح تعمل بمحرك كهربائي لتفجير الهواء عبر المبادلات الحرارية لتكثيف عادم بخار التوربينات. تختلف كفاءة تبريد البخار وتكثيفه بشكل عكسي مع درجة الحرارة - فكلما كان الهواء المحيط أكثر برودة، زادت كفاءة التبريد والتكثيف وزاد خرج الطاقة.

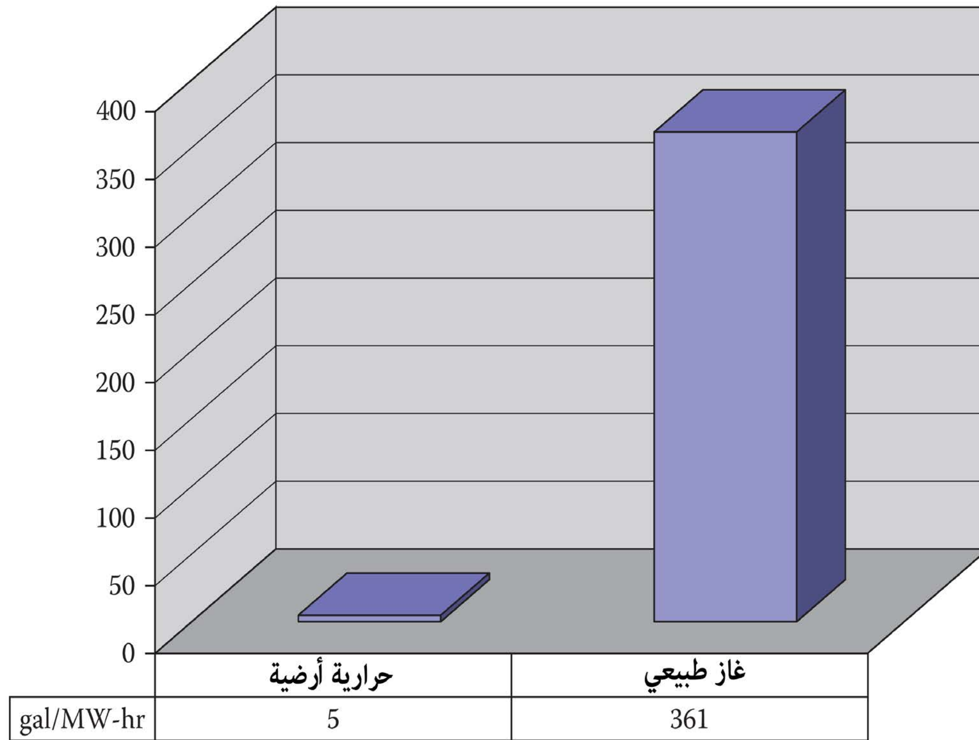
ذكرت أنه في حالة الوحدة ثنائية القاع 15.5 ميغاواط لمنشأة الطاقة الحرارية الأرضية ميرافاليس في كوستاريكا، فإن المكثف المبرد بالهواء سيكلف أكثر من ثلاثة أضعاف، ويغطي أكثر من ثلاثة أضعاف مساحة السطح، ويستهلك أكثر من ثلاثة أضعاف قوة المروحة من برج التبريد المائي.



في منطقة تكون فيها إمدادات المياه السطحية أو الأرضية وفيرة، مثل المناخ الرطب في ميرافاليس، يكون برج التبريد المائي أكثر منطقية. ومع ذلك، في بيئة نيفادا القاحلة، قد يكون هناك ما يبرر النفقات الإضافية والاستخدام الأكبر للأرض بالنظر إلى ندرة المياه المتاحة.

تعوّض التكاليف الأولية المرتفعة للمكثفات المبردة بالهواء بمرور الوقت بسبب تحسين كفاءة التوربينات الثنائية والحفاظ على ضغط الخزان (وإنتاج الطاقة)، حيث تساوي كتلة السوائل المحقونة الناتج.

لا يزال استخدام المياه في منشأة البخار السريع الحرارية الأرضية المبردة بالمياه أقل بكثير من استخدام مصادر الطاقة التي تعمل بالوقود الأحفوري. على سبيل المثال، تتطلب محطة توليد الطاقة بالغاز ذات الدورة المركبة بقدرة 500 ميغاواط 4 ملايين غالون من المياه يوميّاً، بينما تتطلب محطة البخار السريع الطاقة الحرارية الأرضية المبردة بالماء بقدرة 48 ميغاواط نحو 6000 غالون يوميّاً. لذلك، فإن ميغاواط بالنسبة لمحطة غاز، سوف يستهلك أكثر بنحو 70 مرة من المياه من محطة الطاقة الحرارية الأرضية.



مقارنة استخدام المياه لمحطة بخار سريع الحرارة الأرضية المبردة بالمياه ومحطة توليد الطاقة بالغاز الطبيعي ذات الدورة المركبة.

في محطات الطاقة الحرارية الأرضية التقليدية، قد تتضمن طريقة جديدة لتقليل فقدان الماء من خلال التبريد التبخيري واستخدام نظام تبريد هجين. في مثل هذه الحالة، سيبقى التبريد بالتبخير أثناء الطقس الدافئ مستخدماً لتكثيف البخار، ولكن خلال الأشهر الباردة يمكن استخدام تبريد الهواء، ومن ثم تقليل فقدان الماء والحاجة إلى ماء البنية من أجل إمكانية إعادة الحقن. يمكن أن يحدد التحليل الهندسي درجة حرارة الهواء التي يكون عندها الهواء، بدلاً من التبخر، قابلاً للتطبيق من منظور الطاقة والاقتصاد.

• الضـــوضـــاء

تطبق العديد من اللوائح الفيدرالية والمحلية على عمليات الطاقة الحرارية الأرضية. على المستوى الفيدرالي، يتطلب مكتب إدارة الأراضي، الذي طور العديد من مرافق الطاقة الحرارية الأرضية فيه، أن مستوى الضوضاء عند 0.5 ميل من محطة الطاقة الحرارية الأرضية أو حدود الإيجار، أيهما أقرب، لا يجب أن يتجاوز 65 وحدة ديسيبل مرجحة- A A-weighted.

والترجيح -A هو تقنية إلكترونية لتقليد الاستجابة السمعية البشرية للصوت على جميع الترددات. وتتوفر مقارنة بين مستويات الضوضاء الشائعة المختلفة وصوت التشغيل الطبيعي للطاقة الحرارية الأرضية.

لاحظ أن صوت التشغيل الطبيعي للطاقة الحرارية الأرضية هو نحو نصف الصوت الذي يحدث أثناء الحفر والبناء ويمكن مقارنته بصوت حفيف الأوراق الذي يقرب منه النسيم. المرة الوحيدة التي سيتجاوز فيها الصوت التشغيل العادي هي إذا تحرك التوربين، ربما بسبب مشكلة في نظام النقل، وسيتعين توجيه تدفق البخار بعيداً عن التوربين. ويؤدي القيام بذلك إلى السماح للآبار بالبقاء مفتوحة دون إغلاق مفاجئ، ما قد يؤدي إلى إتلاف أغلفة البئر أو صمامات فوهة البئر. بدلاً من ذلك، يوجّه البخار إلى كاتمات الصوت حيث يجري تقليل سرعة البخار بشكل كبير. نظراً لأن الضوضاء المرتبطة بتيار غاز متحرك تتناسب مع السرعة المرفوعة إلى القوة الثامنة، إذا جرى تقليل سرعة البخار بمقدار النصف، فسينخفض الصوت المنبعث بمقدار 256 مرة.

أيضاً، تنخفض شدة الصوت بسرعة مع المسافة بحيث يسجل المائع الأرضي الذي ينطلق عمودياً من بئر مفتوحة على نطاق واسع نحو 65 ديسيبل على مسافة



كيلومتر واحد. ومن ثم، فإن الضوضاء الصادرة عن محطة طاقة حرارية أرضية عاملة لن تزعج على الأرجح أي شخص يعيش في مكان قريب، كما هو الحال مع الأشخاص الذين يعيشون في بليزانت فالي Pleasant Valley، نيفادا، التي تقع على بُعد نحو كيلومتر من محطة الطاقة الحرارية الأرضية في تلال ستيمبوت Steamboat Hills.

في الواقع، تُقدر الضوضاء العادية الصادرة عن حركة المرور على طريق سريع جرى تشييده حديثاً ويقع أسفل محطة توليد الطاقة الحرارية الأرضية تلال ستيمبوت هيلز بنحو 70 إلى 80 ديسيبل، وفقاً للإدارة الفيدرالية للطرق السريعة، أو ما يقرب من مرتين إلى خمس مرات أكثر من تلك الناتجة عن التشغيل العادي للطاقة الحرارية الأرضية.



منظر باتجاه الشمال الشرقي باتجاه محطة توليد الطاقة الحرارية الأرضية ستيمبوت هيلز التي لاحظها السهم الأحمر. تقع المحطة فوق مجتمع بليزانت فالي جنوب رينو، نيفادا. تقع المنازل داخل القطع الناقص البرتقالي على بُعد نحو كيلومتر واحد من المحطة و0.5 كيلومتر من طريق سريع جرى تشييده حديثاً.

• العناصر البصرية

أي إنشاء لم يكن موجوداً من قبل سيغير مجال الرؤية. تكون التأثيرات المرئية لمنشآت الطاقة الحرارية الأرضية ضئيلة بشكل عامٍّ. هذا لأن معظم محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية ليست ذات مكانة عالية. يجري بناؤها عادة في مناطق منخفضة طبوغرافية وتدهن بشكل روتيني لتتماشى مع المناظر الطبيعية.

هذا يقف في تناقض ملحوظ مع توربينات الرياح العالية، وأبراج الطاقة الحرارية الشمسية الواضحة والمروحيات، وأكوام الدخان الطويلة لمحطات الطاقة التي تعمل بالفحم والغاز الطبيعي، وأبراج التبريد الطبيعية الهائلة للعديد من محطات الطاقة النووية.

المشهد الأكثر شيوعاً الذي يتناقض مع وجود منشأة للطاقة الحرارية الأرضية هو تصاعد أعمدة البخار من حين لآخر فوق مرافق التبريد التبخيري في الأيام الباردة. بشكل عامٍّ، لا يجد معظم الناس غيوم بخارية بيضاء عرضية مرفوضة، لأن أي ينابيع ساخنة أو فومارول سطحية قريبة، إن وجدت، ستفعل الشيء نفسه. مع محطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية المبردة بالهواء، لا توجد أعمدة بخار واضحة.



محطة ماموث باسيفيك الثنائي للطاقة الحرارية الأرضية من أورمات في ينابيع كازا ديابلو الساخنة بالقُرْب من ماموث في شرق كاليفورنيا. جرى بناء المنشأة المنخفضة في وادٍ منخفض وهي غير مرئية تقريباً من طريق الولايات المتحدة السريع 395 (يظهر في طرف السهم البرتقالي). المحطة مطلية باللون الأخضر لتنسجم مع البيئة الطبيعية قدر الإمكان. نظراً لأنها منشأة ثنائية مبردة بالهواء، فإن أعمدة البخار غير موجودة. عمود البخار الصغير الظاهر في طرف السهم الأصفر هو كاسا ديابلو فومارول. تتسبب المحطة في القليل من الاضطراب في مجال الرؤية المذهل.

• التحديات البيئية للعمليات الحرارية الأرضية

مع أن تطوير الطاقة الحرارية الأرضية يوفر العديد من الفوائد البيئية، إلا أن بعض التحديات يمكن أن تسبب مشكلات إذا لم تؤخذ في الاعتبار. المجالات الرئيسية الثلاثة للقلق المحتمل هي: هبوط الأرض، والزلازل المستحثة، وتعطيل المظاهر الحرارية المائية السطحية. يمكن أن يكون استخدام المياه أيضاً مصدر قلق مع محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية المبردة بالمياه في البيئات القاحلة، مثل تلك التي نوقشت في مجال الطاقة الحرارية الأرضية كوسو Coso.

• هبـــــوط الأرض

نظراً لسحب السوائل من الخزان في العمق، توجد إمكانية لتهدئة الأرض التي تعلوها. واحدة من أفضل حالات الهبوط الموثقة في مجال الطاقة الحرارية الأرضية هي وايراكي، نيوزيلندا، موقع أول محطة لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية في العالم لتطوير خزان يهيمن عليه السائل.

حددت مسوحات الأراضي للمعايير المعمول بها أن مساحة تبلغ نحو 50 كيلومتراً مربعاً قد خضعت لهبوط وشهدت ما يصل إلى 15 متراً من الاستقرار على مدار الخمسين عاماً الماضية من الإنتاج. من عام 1965 إلى عام 1985، بلغ متوسط معدل الهبوط نحو 450 ملم / سنة، ومن 1987 إلى 1997، تباطأ معدل الهبوط إلى نحو 350 ملم / سنة. وخلال هذه الفترة، لم يعاد حقن أي من السوائل الأرضية المنتجة ولكن جرى التخلص منها في نهر وايكاتو القريب.



بدأ إعادة حقن نحو 25 إلى 30 % من السوائل المنتجة في عام 1997، ومنذ ذلك الحين تباطأ معدل الهبوط إلى نحو 55 ملم / سنة.

يمكن تحديد معدلات الهبوط على مدى فترة زمنية، وفي هذه الحالة كشف عن أن أعلى معدلات الهبوط، بشكل مثير للاهتمام، حدثت على بُعد نحو 0.5 كيلومتر شمال حقل الآبار الشرقي في واياراكي.

كانت درجة الهبوط كافية لإنشاء بحيرة صغيرة أو بركة مترهلة على تيار واياراكي المتدفق باتجاه الجنوب الشرقي والذي يصب في نهر وايكاتو Waikato. في أواخر السبعينيات، أدى الهبوط إلى تمزق مجرى يحمل نفايات ملحية من الآبار (توجد فواصل موجودة عند رؤوس الآبار)، مما أدى إلى انقطاع التيار الكهربائي لمدة 3 أيام حتى أمكن إصلاح المجرى.

مع أن عمليات مسح مستوى الأرض أو المسوحات المحمولة جواً أو الأقمار الصناعية (مثل InSAR) يمكنها تحديد المناطق ومعدلات الهبوط، إلا أنها لا تستطيع تحديد السبب الفعلي للتغيرات في ارتفاع الأرض. والسبب العام هو أن معدلات إنتاج المكمن تجاوزت إلى حد كبير أي تغذية طبيعية، وكما ذكر أعلاه، فإن إعادة حقن المحلول الملحي لم يبدأ حتى عام 1997.

أشارت الدراسات الميدانية الجيولوجية وتسجيل عينات حفر مختارة إلى أن أكبر هبوط حدث عندما كان الغطاء الصخري أعلى الخزان أكثر سمكاً. تتكون صخور الغطاء من طبقات الخفاف المتداخلة والأحجار الطينية ذات قابلية الانضغاط العالية (أي الصخور الضعيفة التي تميل إلى الانضغاط بسهولة).



مع أن إزاحة أكبر هبوط إلى الشمال من حقل البئر لا تزال غير مفهومة بشكل كامل، إلا أن السبب المحتمل قد ينطوي على فقدان سائل المسام في صخرة الغطاء.

نظراً لانخفاض الضغط في الخزان الأساسي من سحب السوائل، فقد يكون سائل المسام في صخر الغطاء قد تم تصريفه إلى أسفل، مما يقلل بشكل فعَّال الدعم ويتسبب في ضغط صخور الغطاء وتهدئة الأرض التي تعلوها. إذا كان الأمر كذلك، فسيكون الانضغاط والهبوط أكبر عندما تكون صخرة الغطاء السميكة.

توجـد أربعـة شـروط رئيسية تسـهل حـدوث الهبوط

- سحب السوائل الجيولوجية التي تتجاوز إعادة الشحن إما بشكل طبيعي وإما من خلال إعادة الحقن عبر الأنابيب.
- صخور ضعيفة وقابلة للانضغاط ميكانيكيّاً داخل الخزان الجوفي الحراري وتغطية الخزان.
- الانكماش الحراري للصخور بالقُرْب من آبار الحقن، كما هو الحال في حقل موكاي Mokai الحراري الأرضي في نيوزيلندا.
- الخزانات الحرارية الأرضية حيث يكون ضغط السوائل تحت الضغط الصخري (يتحمل السائل وزن العمود الصخري العلوي) بدلاً من الضغط الهيدروستاتيكي (وزن الماء فقط).

في الحالة الأخيرة، يسهم ضغط المائع في دعم وزن الصخر المغطى وإزالته ثم يترك العمود الصخري العلوي غير مدعوم جزئيّاً، مما يؤدي إلى الانهيار وتعزيز هبوط السطح. يكون الهبوط أقل احتمالاً في تكوينات المكامن المكونة من صخور صلبة ولكن متصدعة (على سبيل المثال، الصخور المتحولة)، مثل الفوارات الحارة.

بالنسبة للخزانات المطورة في صخور ناعمة مسامية ونفاذة، من ناحية أخرى، مثل الحواف البركانية في واياراكي، يصير الهبوط مصدر قلق أكبر. ومن ثم، يمكن أن يكون الهبوط مشكلة في الخزانات الحرارية الأرضية التي يجري التحكم فيها طبقيّاً والتي تتميز بنفاذية أولية مقارنة بالخزانات التي يتحكم فيها هيكلياً في الصخور الصلبة التي لها نفاذية ثانوية تتحكم في التصدع.

ربما يكون أفضل أسلوب لتخفيف الهبوط هو إعادة حقن المحلول الملحي للنفايات في الخزان. مع أن إعادة الحقن لا يضمن تجنب الهبوط، إلا أنه يقلل من المخاطر ويطيل أيضاً من عمر الخزان، إذا أُجري بشكل صحيح لتقليل الاختراق الحراري (التبريد السريع غير المرغوب فيه للخزان).

هذا هو السبب في أن الهبوط لا يمثل مشكلة بالنسبة لمحطات الطاقة الحرارية الأرضية الثنائية المبردة بالهواء، حيث يعاد تدوير مائع الطاقة الحرارية الأرضية بالكامل ولا يحدث فقدان لكتلة السوائل في الغلاف الجوي من أبراج التبريد التبخيري.

في منطقة إمبريال فالي في جنوب كاليفورنيا، التي لديها أكثر من 500 ميغاواط من السعة الحرارية الأرضية المركبة، كُشف عن هبوط من خلال دراسات قياس التداخل للرادار ذي الفتحة الاصطناعية (InSAR). ربما يعكس بعض الهبوط فقدان السوائل من الخزانات الحرارية الأرضية المنتجة عبر أبراج التبريد التبخيري.

من المُهمِّ تحديد تشوه سطح الأرض، حيث يمكن أن يؤثر الهبوط غير المتكافئ سلباً في تدفق المياه في قنوات الري في هذه المنطقة ذات الأهمية الزراعية. يمكن استهداف مناطق الهبوط لإعادة حقن الطاقة الحرارية الأرضية للمساعدة في الحفاظ على ضغط الخزان وتقليل الهبوط.

يعد توليد الطاقة المتجددة والزراعة من المحركات الاقتصادية الرئيسية لمنطقة إمبريال فالي، ومن ثم يجب أن تبقى هاتان الصناعتان متوافقتين.

• الــــزلازل المستحثـــــة

يمكن أن تتطور الزلازل المرتبطة بعمليات الطاقة الحرارية الأرضية من عدة عوامل:

- ✓ حقن المياه الباردة في الصخور الساخنة مما يؤدي إلى انكماش وتكسير حراري.
- ✓ استخراج السوائل من الخزانات يسبب تغيراً في ضغط السوائل مما يؤدي إلى حركة الصخور المكسورة (يحدث هذا في حقول النفط والغاز الطبيعي في بعض الأحيان أثناء الاستخراج).
- ✓ حقن السوائل تحت ضغط مرتفع مما يؤدي إلى تكسير الصخور وزيادة نفاذية الخزان (على غِرار ملء الخزان الكهرومائي لأول مرة).

عندما تتكسر الصخور، تُطلق الطاقة التي يمكن أن تنتقل إلى السطح ويشعر بها الناس في المنطقة. في الزلازل الطبيعية الكبيرة التي تبلغ قوتها > 7، تتمزق الكسور (الصدوع) لمئات الكيلومترات في الطول. بالنسبة لحقول الطاقة الحرارية الأرضية، يبلغ طول أي كسور حديثة التكوين بضعة سنتيمترات أو أقل، مع إمكانية تشكيل آلاف أو عشرات الآلاف بمرور الوقت.

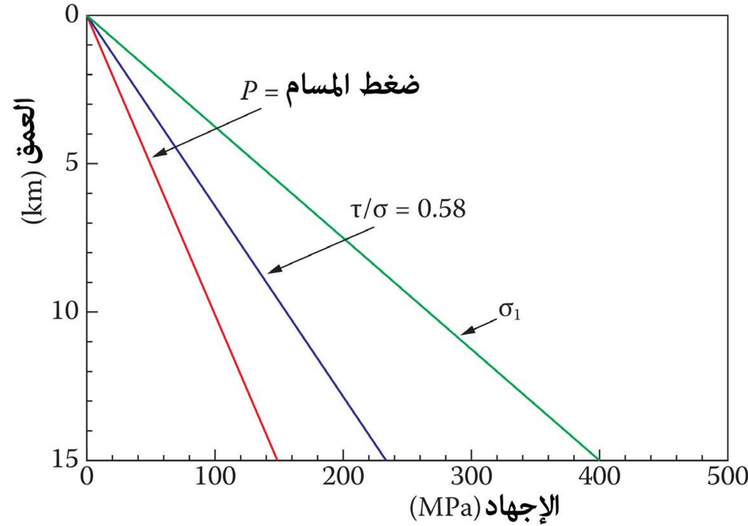
تقريباً كل حقل من حقول الطاقة الحرارية الأرضية قيد الاستغلال قد تعرض للزلازل المستحثة إلى حدٍ ما. في معظم الحالات، لا يمكن للناس الشعور بمثل هذه الزلازل المستحثة، ولا تكتشف الهزات الناتجة، التي تسمى الزلزالية الميكروية Microseismic (المقادير عموماً أقل من 2)، إلا عن طريق أدوات قياس الزلازل الحسَّاسة.



وقع أكبر حدث زلزالي مستحث مرتبط بإنتاج الطاقة الحرارية الأرضية في The Geysers. من المحتمل أن يكون الدافع وراء ذلك هو الحقن البارد لمياه الصرف الصحي البلدية في الصخور الساخنة الذي يجري للمساعدة في الحفاظ على ضغط السوائل في الخزان ومخرجات الطاقة. وسجلت شدة هذا الحدث 4.6 درجة وهز المباني وأعصاب سكان المنطقة الريفية. معظم الزلازل المستحثة في منطقة الفوارات الحارة أقل من 3 درجات من حيث المقدار، ولا يشعر بها الناس أو لا يدركها الناس بالكاد.

عندما يصطدم الماء البارد بالصخور الساخنة، تتقلص الصخور، مما يتسبب في تكوين الكسور التي تولد الزلازل التي يختلف حجمها أو حجمها بشكل مباشر مع حجم وعدد الكسور المتكونة. يرتبط مدى الانكماش والكسور التي تم تطويرها بمعاملات التمدد الحراري للمعادن التي تتكون منها الصخور.

كلما زاد الاختلاف في درجة الحرارة بين السوائل المحقونة وصخور الخزان، زاد معامل التمدد، ولكن لأن الصخر يبرد عند ملامسته للسائل المحقون ΔT (Tf – Ti) يكون سالبًا. لذلك، في حالة الطاقة الحرارية الأرضية، يكون معامل التمدد سالبًا أو معامل انكماش إيجابيّاً.

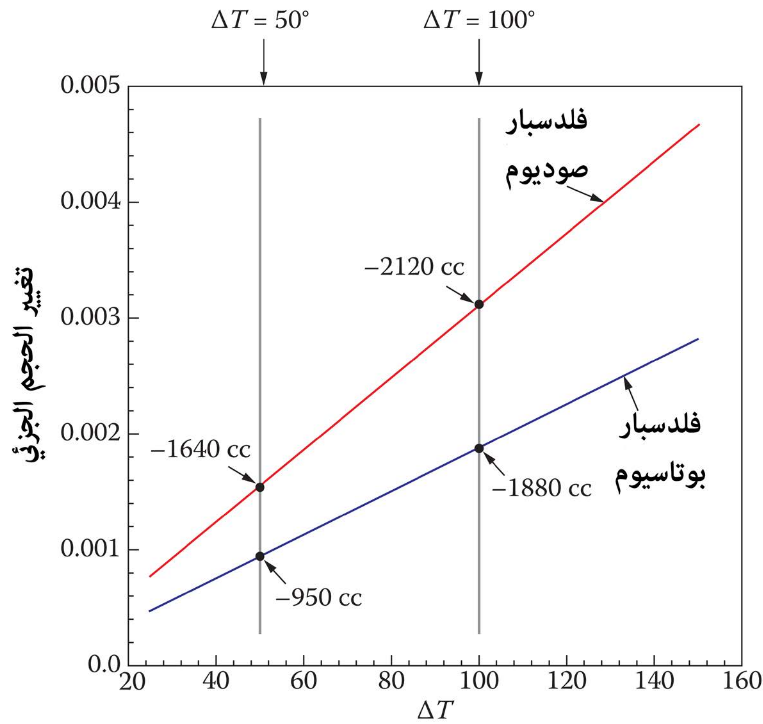


رسم بياني يوضح التغير في قوة الصخور للجرانيت بعمق لثلاثة ظروف مختلفة: σ1 للغرانيت غير المكسور، τ / σ = 0.58 (حيث τ: إجهاد القص و σ: إجهاد الشد) هو حد قوة الصخور للجرانيت المكسور، وP للجرانيت المشبع بالماء تحت ظروف الضغط الهيدروستاتيكي. تزداد القوة في جميع الحالات مع العمق، مما يعكس زيادة ضغط الحصر مما يزيد من قوة الصخور. تعكس القوة المنخفضة لـ P قدرة الماء على تقليل الإجهاد الفعَّال وإضعاف الروابط الكيميائية.

علاوة على ذلك، فإن إضافة الماء تزيد من ضغط الماء في المسام وتقلل من قوة الاحتكاك للصخور، مما يسهل كسرها. يمكن أن تؤدي المياه المضافة أيضاً إلى إضعاف الصخور كيميائيّاً، مما يجعلها أكثر عرضة للانزلاق على طول الكسور الموجودة أو تكوين كسور جديدة، مما يؤدي إلى حدوث الزلازل.

يتم حقن محلول ملحي للنفايات في إنتاج الحقول الحرارية الأرضية عادة تحت ضغط منخفض، إما رأس هيدروستاتيكي وإما ضغوط أعلى قليلاً، اعتمادًا على مسامية ونفاذية الصخور في موقع الحقن. مع أنظمة الطاقة الحرارية

الأرضية (EGSs)، يتم حقن السوائل تحت ضغط أعلى لتحفيز نفاذية الكسر في الصخور على عمق تكون فيه درجات الحرارة مرتفعة ولكن النفاذية الحالية أو الطبيعية منخفضة. هذه الكسور التي تم إنشاؤها حديثًا تخلق زلازل (صغيرة عادة)، ولكن في بئر تجريبي للطاقة الحرارية الأرضية في بازل، سويسرا، تسبب التصدع المستحث في حدوث زلازل تصل قوتها إلى 3.4 مما أثار قلق السكان لدرجة أنه تم إغلاق العملية.

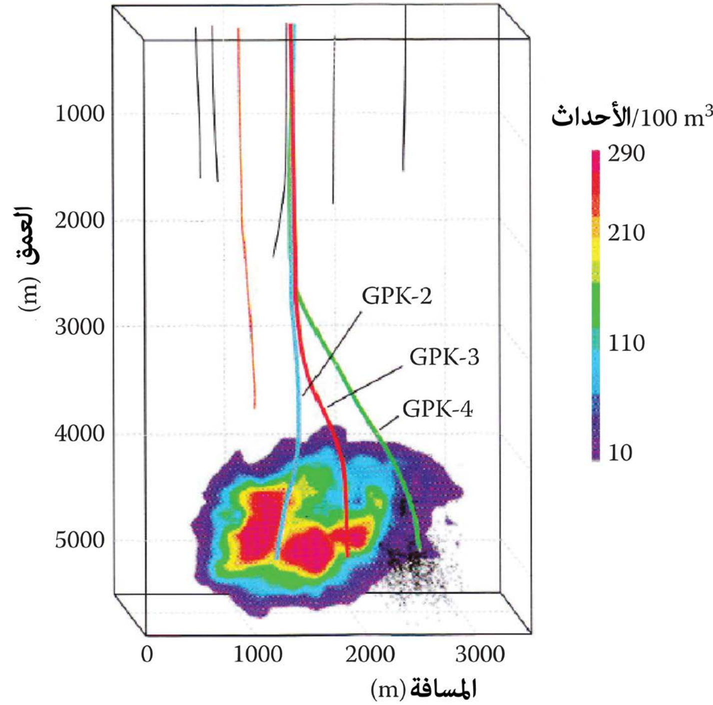


رسم بياني يوضح تغير الحجم الجزئي لفلدسبار الصوديوم والبوتاسيوم كدالة لاختلاف درجات الحرارة. لاحظ أن درجة الانكماش تزداد مع اختلاف درجة الحرارة بين صخر الخزان والسائل المحقون، مما يزيد من الميل لتكوين الكسور والأحداث الزلزالية. الصخور التي تتكون أساسًا من الفلسبار الصوديوم سوف تتقلص أكثر لتغير معين في درجة الحرارة من الصخور التي يهيمن عليها الفلسبار البوتاسيوم ومن ثم يمكن أن تولد الزلازل المستحثة بشكل أكبر.



بشكل عامٍّ، فإن الزلزالية المستحثة تكون في الغالب على مستوى الزلزالية الميكروية ويمكن أن تكون مفيدة لتطوير خزان حراري أرضي -على سبيل المثال- تسمح الضوضاء الصوتية الناتجة عن أحداث الزلزالية الميكروية برسم خرائط للكسور المتكونة لتحديد حجم الخزان المشكل حديثاً. وقد حدث ذلك في سولتز سوس فوريتس Soultz-sous-Forêts، في فرنسا، وهي محطة طاقة حرارية أرضية عاملة لشركة EGS تنتج من خزان على عمق 4500 إلى 5000 متر. كما ينفذ حاليًا في بركان نيوبيري Newberry Volcano في وسط ولاية أوريغون، حيث نجحت شركة استكشاف الطاقة الحرارية الأرضية في تحفيز خزان صغير متحكم فيه (نحو 1 كيلومتر مكعب) في صخور ساخنة وجافة (غير مُنَفِّذة).

في أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية التقليدية، يمكن تعيين الضوضاء الصوتية للأحداث الزلزالية بوساطة أدوات حسَّاسة وعالية الدقة لتوفير معلومات في الوقت الفعلي حول دوران السوائل عبر الخزان، ويمكن أن تحدد الأجزاء الأكثر نفاذية من الخزان كما تعكسها الكسور والصدوع.



مقطع عرضي لكنتور الكثافة للأحداث الزلزالية المرتبطة بالتحفيز الهيدروليكي للصخور البلَّورية العميقة في سولتز سو فوريتس، فرنسا. تعكس الخريطة الكنتورية فترتين من التكسير المائي للآبار GPK-2 وGPK-3. النقاط السوداء مخصصة للأحداث الزلزالية الفردية التي يجري تحفيزها من البئر GPK-4.

نظراً لأن التمييز بين الأحداث الزلزالية الطبيعية والمستحثة قد يكون أمراً صعباً، يجب جمع خط الأساس للبيانات الزلزالية قبل وخلال تشغيل منشأة الطاقة الحرارية الأرضية. علاوة على ذلك، إذا كان السكان يعيشون في المناطق المجاورة، يجب تنفيذ برنامج تعليمي لإبلاغ الناس بالأحداث الزلزالية التخريبية المحتملة وغير المحتملة، وربما إنشاء خط ساخن للإبلاغ عن الحوادث المحتملة.

سيساعد الحفاظ على خط أساس للأحداث الزلزالية أيضاً في التمييز بين النشاط المرتبط بعمليات الطاقة الحرارية الأرضية وبين الأحداث الطبيعية



الكبيرة المحتملة. قد يكون القيام بذلك مفيدًا لإثبات أن عملية الطاقة الحرارية الأرضية لم تكن سبباً لزلزال مدمر محتمل بشكل طبيعي.

• اضطراب المظاهر السطحية الحرارية المائية

من المؤكد أن تعطيل خصائص الطاقة الحرارية الأرضية الطبيعية الموجودة (مثل الينابيع الساخنة والفوارات الحارة) على السطح هو تأثير يجب مراعاته. توجد أمثلة عديدة حيث أدى التطور إلى تغيير المظاهر السطحية المائية الحرارية.

وخير مثال على ذلك هو استخدام نظام واياراكي للطاقة الحرارية الأرضية في نيوزيلندا. قبل التطوير، كان وادي تيار واياراكي يستضيف 22 ينبوعَ ماءٍ حاراً نشطاً إلى جانب العديد من الينابيع الساخنة، وكان يُعرف باسم Geyser Valley. بحلول منتصف السبعينيات، جرى إطفاء الينابيع الحارة واستبدالها بفوماروول وأرض تبخير، وأعيدت تسمية المنطقة بوادي واياراكي الحراري.

مثال آخر على تغيير السمات الحرارية السطحية الناجم عن التطور التجاري للطاقة الحرارية الأرضية حدث في بيواوي Beowawe في شمال شرق نيفادا. كان بيواوي موقعاً لثاني أكبر حقل ينبوع ماء حار في الولايات المتحدة الأمريكية، بعد يلوستون، وهو موجود حالياً فقط على شكل شرفة متكلسة كبيرة مع بعض البِرك الحرارية سريعة الزوال التي تظهر في السنوات الرطبة.

كل من بيواوي وواياراكي عبارة عن أنظمة طاقة حرارية سائلة يهيمن عليها السائل، والتراجع عن الإنتاج قد تأثر بشكل واضح بالخصائص الحرارية



السطحية. في واياراكي، كما ناقشنا ذلك سابقاً، لم تبدأ إعادة الحقن إلا بعد 40 عاماً تقريباً من بدء الإنتاج.

في بيواوي، مع أن إعادة الحقن حدث مع الإنتاج، فقد حدثت خسارة مائع صافية من الخزان بسبب فقدان التبخر من أبراج التبريد والاتصال المباشر إلى حدٍ ما بين المياه الأرضية الضحلة وطبقات المياه الأرضية الأعمق.

من الأمثلة الأخرى التي يستشهد بها بشكل شائع على الميزات الحرارية السطحية التي جرى اختراقها أو إخمادها في حقل الطاقة الحرارية الأرضية ينابيع ستيمبوت المنتج، جنوب رينو، نيفادا. فقد بدأ الإنتاج التجاري للطاقة الحرارية الأرضية هناك في عام 1986، وقبل ذلك الوقت، دعمت شرفة السيليكا المجاورة العديد من الينابيع الساخنة.





منظر باتجاه الشمال عبر شرفة السيليكا الرئيسية في ينابيع ستيمبوت في عام 1986. ينبوع النافورة في المقدمة يقوم برش المياه إلى ارتفاع نحو مترين. منذ تطوير مرافق الطاقة الحرارية الأرضية في أواخر الثمانينيات واستمرار تطوير الضواحي في المنطقة المجاورة، انخفضت مستويات المياه الأرضية ولم تعد شرفة السيليكا تستضيف الينابيع الساخنة النشطة. تنتج أبخرة التكثيف الفوماروليك فقط من الكسور والشقوق.

بحلول منتصف وأواخر التسعينيات، لم تعد الينابيع الساخنة موجودة، وكانت الشقوق الموجودة في شرفة السيليكا تنتج فقط أعمدة صغيرة من البخار المتكثف.

ومع ذلك، فإن سبب زوال النشاط الحراري السطحي النشط في ستيمبوت أكثر تعقيداً لأن الانخفاض تزامن أيضاً مع التطور السكني السريع في المنطقة وحفر آبار المياه الضحلة لدعم النمو.



علاوة على ذلك، باستثناء محطة البخار السريع المبردة بالماء تلال ستيمبوت، التي تعد الأبعد من شرفة سيليكا، فإن جميع محطات الطاقة الخمس الأخرى في ستيمبوت هي منشآت ثنائية مبردة بالهواء يجري فيها إعادة تدوير سوائل الطاقة الحرارية الأرضية بالكامل ولا يوجد فقدان تبخر للسوائل.

علاوة على ذلك، تشير دراسات التتبع الكيميائي التي أجراها المشغّل الحالي، أورمات، إلى أن الكاشف المحقون يبقى في الآبار الحرارية الأرضية. لم يكشف عن أي منها في المراقبة الضحلة أو آبار مياه الشرب، بحجة أن طبقات المياه الأرضية الحرارية الأرضية والمياه الأرضية الضحلة منفصلة ولا تتواصل مع بعضها بعضاً.

لذلك، فإن تدهور الميزات الحرارية السطحية في ستيمبوت يبدو أقل نتيجةً للتطور التجاري لمورد الطاقة الحرارية الأرضية من انخفاض المياه الأرضية الضحلة المسخنة بوساطة آبار المياه لدعم النمو السكني المحيط.



منظر للظروف الحالية في شرفة سيليكا ستيمبوت Steamboat silica. الشقوق بين الشمال والجنوب لا تصدر حالياً سوى سحب ضعيفة من البخار المتكثف؛ قبل منتصف الثمانينيات من القرن الماضي، قاموا بإنتاج المياه المغلية المتدفقة وينابيع الينابيع أو الفوارات الحارة الصغيرة.

أخيراً، يجب إدراك أن جميع ميزات الطاقة الحرارية الأرضية السطحية يمكن أن تتغير أيضاً لأسباب طبيعية، كما هو موضح جيداً في حديقة يلوستون الوطنية. الزلازل -على سبيل المثال- يمكن أن تؤثر في أنظمة الشبكات المائية الحرارية التحت سطحية ومن ثم تدفق السوائل إلى الينابيع الساخنة أو الفوارات الحارة، في بعض الحالات تعزز معدلات التدفق والنشاط وتقلّلها في حالات أخرى.

لتقليل الآثار الضارة المحتملة، يجب إجراء دراسات أساسية قبل التطوير التجاري لموارد الطاقة الحرارية الأرضية. وتشمل هذه الدراسات رسم خرائط مواقع السمات الحرارية السطحية الموجودة؛ وقياس درجات الحرارة ومعدلات التدفق وتواتر أي نشاط تسخين؛ وتحديد كيمياء الموائع.

يمكن أيضاً استخدام الآبار المتدرجة في درجات الحرارة لمراقبة اتجاه ومعدلات تدفق المياه الأرضية الضحلة والسوائل الحرارية الأرضية العميقة قبل الإنتاج وأثنائه. من المحتمل أن يكون تقليل محلول ملحي للنفايات هو أفضل تقنية ليس فقط للحفاظ على استدامة المورد على المدى الطويل، ولكن أيضاً للتخفيف من اضطراب الظواهر الحرارية الأرضية السطحية.

ومع ذلك، فإنّ إعادة الحقن قد تكون غير كافية لردع اضطراب السمات الحرارية السطحية، كما هو مذكور أعلاه في بيواوي، نيفادا. ولكن في حالات أخرى، كما هو الحال في واياراكي، في نيوزيلندا، ربما جرى تقليل التغييرات في المعالم الحرارية السطحية عن طريق إعادة شحن الخزان من خلال إعادة حقن المحاليل الملحية للنفايات.

• الأداء البيئـــي

لا تتأثر الطاقة الحرارية الأرضية بشكل عامٍّ بالطقس أو التغيرات الموسمية، ومن ثم تنتج بشكل شبه دائم على عكس بعض التقنيات المتجددة الأخرى التي يختلف إنتاجها للطاقة والحرارة بمرور الوقت.

يمكن أن تقلل المضخات الحرارية الأرضية من استهلاك الطاقة بنسبة تصل إلى 44 % مقارنة بمضخات تسخين مصدر الهواء وما يصل إلى 72 % مقارنة بالتسخين بالمقاومة الكهربائية باستخدام معدات تكييف الهواء القياسية.

لا يؤدي استخدام الحرارة الأرضية إلى زيادة حصة الطاقة الخضراء وتقليل انبعاثات تلوث الهواء فحسب، بل يسهم أيضاً على المدى الطويل في كفاءة الطاقة في المحطة نظرًا لأنه يفرض على نظام التدفئة عكس مستوى درجة الحرارة الحقيقي المطلوب من قبل معالجته.

عند النظر في دورة الحياة، يعتبر الأداء البيئي للطاقة الحرارية الأرضية من بين الأفضل، أيضاً مقارنة بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى. تعد انبعاثات غازات الدفيئة (GHG) الصادرة عن محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية، كما ذكرت من قبل IPCC عام (2012)، من بين أدنى مصادر الطاقة.

نظراً لأن إنتاج الحرارة والكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية لا يتطلب احتراقاً، فإن معدل الانبعاث الإجمالي منخفض بشكل خاصٍّ. وهذا ينطبق على جميع تطبيقات التدفئة والتبريد ومعظم إنتاج الطاقة.

يتعلق الاستثناء الوحيد الظاهر باستخدام موائع حرارة الأرض الغنية بالغازات بشكل طبيعي، كما هو الحال في بعض المناطق ذات الموارد عالية الحرارة. في



هذه الحالات، مع أن الغازات لا تُشتق مباشرة من العمليات الصناعية وهي أقل من أي طاقة وقود أحفوري (باستثناء بعض الاستثناءات المتعلقة بأفضل تقنيات الغاز الطبيعي)، فقد كان هناك بعض الجدل الأخير في أوروبا. ستكون تقييمات دورة الحياة الإضافية ضرورية لتوضيح الأمر.

الدروس المستفادة من تجارب بعض الدول في مجال الاستفادة من الطاقة الحرارية الأرضية

ذكرنا سابقاً أن العديد من دول العالم قد نفّذت محطات في مجال الطاقة الحرارية الأرضية واستفادت منها في شتى المجالات. مثلاً البلدان الآتية استفادت كثيراً من الحرارية الأرضية:

- **الولايات المتحدة** 3086 **ميغاواط** 0.3 %.
- **الفلبين** 1904 **ميغاواط** 27 %.
- **إندونيسيا** 1197 **ميغاواط** 3.7 %.
- **المكسيك** 983 **ميغاواط** 3 %.
- **إيطاليا** 843 **ميغاواط** 10 %.
- **نيوزيلندا** 700 **ميغاواط** 10 %.
- **أيسلندا** 575 **ميغاواط** 30 %.
- **اليابان** 536 **ميغاواط** 3 %.
- **السلفادور** 204 **ميغاواط** 14 %.
- **كينيا** 167 **ميغاواط ميغاواط** 11.2 %.

ولذلك سنسلط الضوء هنا على تجربتين الأولى في المكسيك، والثانية في اليابان عسى أن نستفيد منهما.




• التجربة الأولى: محطة كهرباء سيرو بريتو، باجا كاليفورنيا نورتي، المكسيك

كانت المكسيك من بين أوائل الدول التي قامت بتشغيل محطة طاقة حرارية أرضية تجارية في مورد يهيمن عليه السائل، حيث جرى تشغيل أول محطة ذات تدفق بخار سريع أحادي في عام 1973. حالياً، تعد المكسيك رابع أكبر مولد للكهرباء من الطاقة الحرارية الأرضية في العالم بإجمالي قدرة مركبة تبلغ 983 ميغاواط. تتجمع المحطات في خمسة مواقع؛ كل منها مملوك ومدار من قِبَل هيئة الكهرباء المكسيكية، Comision Federal de ´ Electricidad (CFE).



مواقع استثمار الطاقة الحرارية الأرضية في المكسيك.



تقع لوس أزوفريس Los Azufres ولوس هوميروس Los Humeros داخل المحور الشرقي الغربي، وهو محور نيوفولفانيك الذي يشمل العاصمة، مكسيكو سيتي، وغوادالاخارا، ثاني أكبر مدينة في البلاد. لوس أزوفريس هو حقل كبير يدعم 188 ميغاواط من مجموعة متنوعة من أنواع المحطات التي تتكون من سبع وحدات تكثيف تصل إلى الهواء باستطاعة 5 ميغاواط، وأربع وحدات تكثيف بقدرة 25 ميغاواط ووحدة تكثيف واحدة بقدرة 50 ميغاواط، ووحدتين ثنائيتين بقدرة 1.5 ميغاواط لكل منهما.

جرى تطوير موقع لوس هوميروس بثماني وحدات استنفاد في الهواء باستطاعة 5 ميغاواط، وبسعة إجمالية 40 ميغاواط، ووحدة تكثيف أحادية البخار السريع 25 ميغاواط. وحدة ثنائية 300 كيلوواط تخدم المجتمع الريفي في ماغواريشيك Maguarichic. يقع لاس تريس فيرجينسيس Las Tres Virgenesis في منتصف الطريق تقريباً أسفل شبه جزيرة باجا كاليفورنيا في مجمع بركاني، ويولد 10 ميغاواط من وحدتين 5 ميغاواط. ويقع سيرو بريتو Cerro Prieto، جنوب إمبريال فالي بكاليفورنيا، على الحدود مباشرة من الولايات المتحدة، وقدرته المركبة 720 ميغاواط. كنظام، أنتجت محطات الطاقة الحرارية الأرضية 7047 غيغاواط ساعة من الكهرباء في عام 2008، لتسجل بذلك ارتفاعاً إلى 6281.66 غيغاواط ساعة في عام 2003، وأنتجت نحو 3 % من إجمالي الكهرباء المولدة في المكسيك، وكان عامل السعة الإجمالية 84 % لهذا العام.

على عكس جيرانها من الطاقة الحرارية الأرضية في الشمال، كانت سيرو بريتو منطقة فيها العديد من المظاهر الحرارية السطحية، مثل الينابيع الحارة والبراكين الطينية والأرض المتغيرة. ليس من المستغرب أن يكون أول حفر استكشافي في منطقة النشاط الحراري.

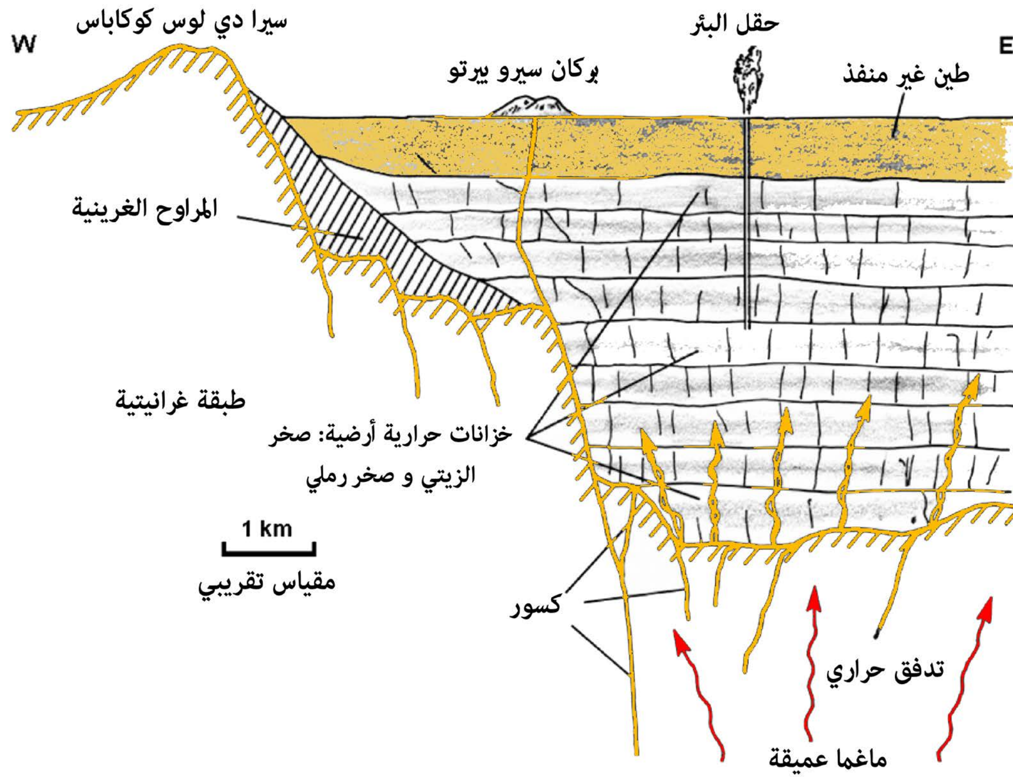


نظرة علوية على جزء من حقل البئر الذي يدعم أربع محطات طاقة من طراز سيرو بريتو.

يقع الحقل شرق بركان سيرو بريتو، وهو صرح متآكل يبلغ طوله 225 متراً فوق سطح البحر، داخل وادي مكسيكالي المسطح جدّاً.

ويقع بركان سيرو بريتو مباشرة على صدع سيرو بريتو وهو الحد الغربي الواضح للخزان. يقع الحقل بين هذا الصدع والصدع الإمبراطوري إلى الشرق

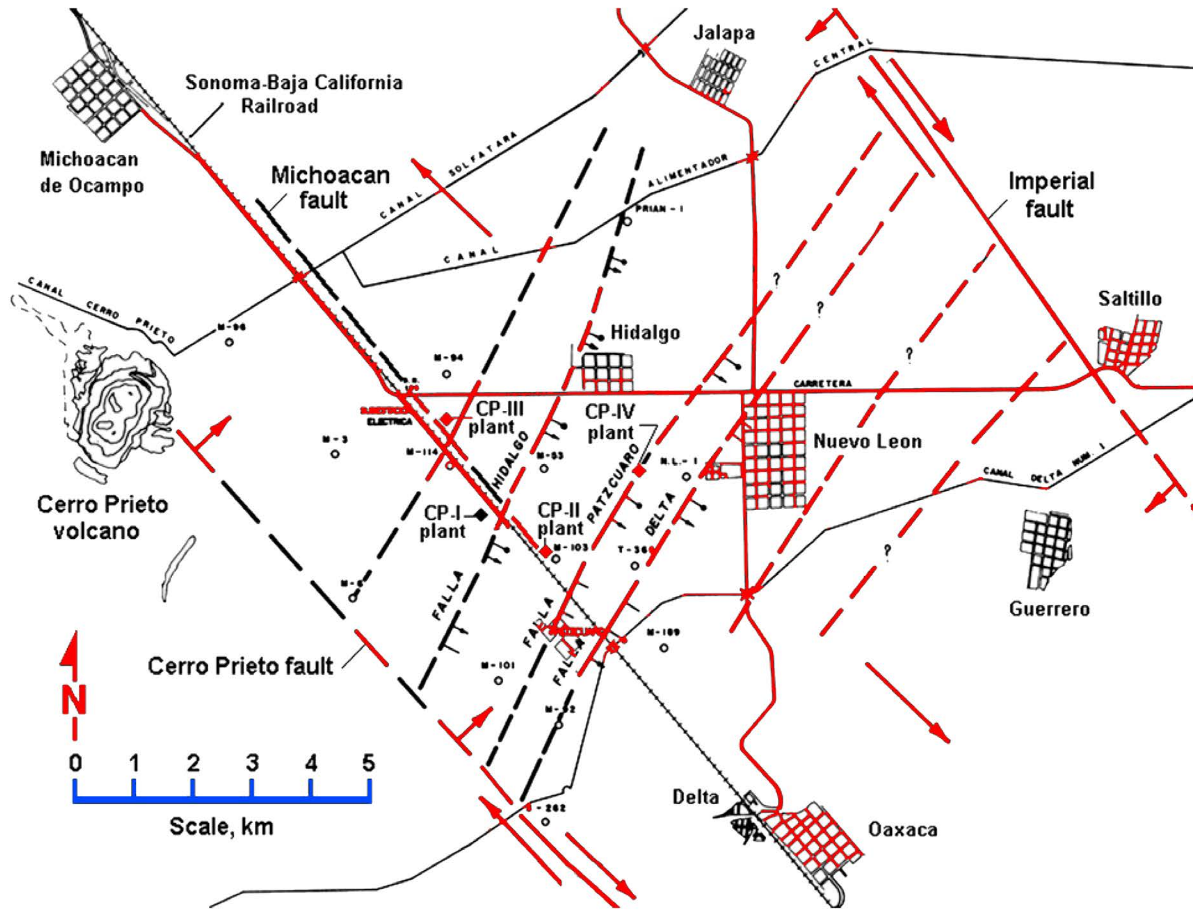
داخل قاذفة عميقة للأسفل. يسير صدع ميتشواكان بالتوازي مع صدع سيرو بريتو، ويؤدي تقاطعه مع واحد أو أكثر من العيوب العرضية إلى نفاذية عالية والوصول إلى سوائل 350 درجة مئوية على أعماق نحو 2000 متر.



مقطع عرضي جيولوجي ينظر عموماً إلى الشمال عبر الجزء الغربي من خزان سيرو بريتو.

يتكوّن الخزان من طبقات متناوبة من الأحجار الرملية الدلتا والرواسب ذات الأصل القاري، والصخور الصخرية التي تعمل كحواجز بين الطبقات النفاذة من الأحجار الرملية. المنطقة جزء من مركز منتشر أدى إلى ظهور صدوع عرضية متعامدة إلى حد ما مع صدوع سيرو بريتو وميشوكان وإمبريال. تنشأ

هـذه الصـدوع المسـتعرضة عـن طريـق التوتـر، ومن ثم فهي مفتوحة لتدفق السـوائل. لقـد عثـر علـى النفاذيـة ودرجـات الحـرارة المرتفعـة في أعمـاق ضحلـة نسـبيّاً في الطرف الغربي، وفي أعماق أعمق بشكل تدريجي مع تحرك المرء إلى الشرق.



مخطط لحقل الطاقة الحرارية الأرضية سيرو بريتو يُظهر الصدوع الرئيسية. تحوي المنطقة الواقعة بين صدع سيرو بريتو وخطوط السكك الحديدية على آبار CP-I، الوحدات 1-5. توفر المنطقة الواقعة بين خطوط السكك الحديدية ومجتمعات هيدالغو ونويفو ليون CP-II، الوحدتان 1 و 2، و CP-III، الوحدات 1 و 2. يقع CP-IV في القسم الشرقي من الميدان.

ترتفع السوائل الحرارية الجوفية الساخنة على طول صدوع التوتر المفتوحة، هيدالغو، وباتزكوارو، ودلتا، في وسط الحقل، وتختلط مع السوائل الباردة الداخلة من الشمال الشرقي من اتجاه جالابا ومن الغرب لإعادة الشحن من سييرا دي لوس كوكابا. يمكن رؤية الحدود الجنوبية الغربية للحقل بوضوح في الانخفاض الحاد في درجة الحرارة في الآبار المحفورة بالقُرْب من صدع سيرو بريتو. يكون الانخفاض في درجات الحرارة أكثر تدريجيّاً في اتجاه الشمال الشرقي. يبدو أن درجات الحرارة التي تصل إلى 350 درجة مئوية يمكن الوصول إليها على أعماق تقل عن 3000 متر فوق مساحة سطح تبلغ نحو 5 كيلومترات مربعة تقع بين موقع أول محطة طاقة، CP-I، ومجتمعات هيدالغو ونويفو ليون.

يعتبر سيرو بريتو أحد أكثر الخزانات دراسة في العالم. جرى تطبيق كل أداة جيولوجية يمكن تخيلها للحصول على فهم جيد للحقل.

ومع ذلك، فإن الاستكشاف المبكر حدث بوساطة ريشة الحفر. كما ذكرنا، كان واضحاً إلى حد ما من المظاهر الحرارية؛ حيث يمكن العثور على السائل الساخن، واكتشفت الآبار الأولى سوائل 180 درجة مئوية على أعماق ضحلة نسبيّاً.

بالانتقال إلى الشمال الشرقي والحفر أعمق إلى حد ما، 800–1400 متر، نتج عن السوائل بدرجات حرارة تتراوح بين 250 و 280 درجة مئوية. عثر على السوائل الأكثر سخونة فقط من خلال حفر الآبار المتدرجة في أقصى الشرق، وإن كان ذلك على أعماق أكبر.

ساعدت كتلة الدراسات العلمية في تحديد الحقل والسماح لنتائج الحفر بتناسب نموذج ثابت للخزان. يشمل العمل العلمي: المسوحات الجيوهيدرولوجية، والكيمياء

الجيولوجية الحرارية المائية، والجاذبية والدقة، والقياس الجيوحراري للغاز، والمقاومة، والمغناطيسية، والزلزال النشط والسلبي، والقدرات الذاتية، وتتبع الغازات النبيلة، وكشف الرادون والأمونيا، ومراقبة الهبوط، وكشف الزلازل الدقيقة.

بنيت نماذج الخزانات بناءً على هذه الثروة من المعلومات. وطوّر نموذج رقمي واحد لتقييم إمكانية إضافة محطة بقدرة 80 ميغاواط إلى المصانع الثلاثة الموجودة آنذاك باستخدام الآبار إلى الشرق من تلك التي كانت تزود CP-III.

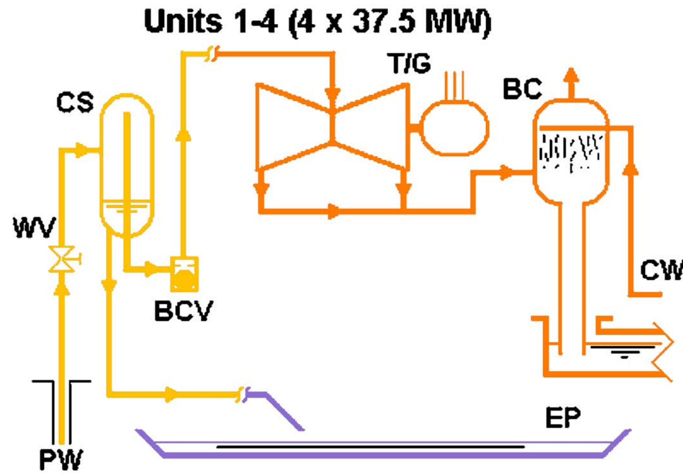
أشارت المحاكاة إلى أن المحطة المقترحة يمكن أن تعمل لمدة 30 عاماً مع استراتيجية إعادة الحقن المصممة بشكل صحيح. على هذا الأساس، في عام 2000، قامت CFE ببناء محطة CP-IV، بقدرة 100 ميغاواط.

• محطات توليد الطاقة من طراز سيرو بريتو

جرى تطوير وحدات الطاقة في سيرو بريتو بالتتابع على مدار 27 عاماً بدءاً من CP-I Unit 1 في عام 1973 وبلغت ذروتها في عام 2000 بتركيب المحطة المكونة من أربع وحدات بطاقة 100 ميغاواط في CP-IV.

1. وحدات 1-5 سيرو بريتو I

يحوي الطراز سيرو بريتو I (CP-I) على أربع وحدات بخار سريع فردي تبلغ كل منها 37.5 ميغاواط ووحدة بخار سريع ثنائية تبلغ 30 ميغاواط. وشغلت الوحدات الخمس من عام 1973 إلى عام 1981. ويمثل تاريخ هذه الوحدات إحدى خصائص الخزانات الحرارية الأرضية، ألا وهي التطور والتغير. محطة CP-I هو مثال على نظام واحد سريع البخار وثنائي مدمج.



مخطط تدفق مبسط للوحدات 1-4 ، CP-I. وهو تصميم أساسي بخاري سريع أحادي يتضمن تصريف نفايات المحلول الملحي على السطح إلى حوض تبخر كبير.

لم يعتمد التخلص من المياه في البداية لأسباب عدة:

- **أولاً**: لم تكن هناك معلومات كافية متاحة حول آليات سلوك الخزان في الأيام الأولى للتأكد من إمكانية تجنب التداخل.
- **ثانياً**: نظراً لارتفاع درجات حرارة الموائع الأرضية، كان تركيز السيليكا مرتفعاً بما يكفي لإثارة القلق بشأن انسداد آبار إعادة الحقن، مع أن درجة حرارة خروج المحلول الملحي من الفواصل كانت مرتفعة بدرجة كافية لتجنب التشبع الفائق.
- **ثالثاً**: كانت المنطقة الواقعة إلى الغرب من المحطة غير منتجة من حيث الحرارة الجوفية، وتنتشر فيها المواقع والبراكين الطينية، وغير صالحة للاستعمال للرعي أو الزراعة، ومن ثم قدمت حلاً سهلاً للتخلص من المياه المالحة. واليوم، تغطي بركة التبخير مساحة 14 كيلومتراً مربعاً تقريباً.

مع زيادة المعرفة بالخزان من العديد من الدراسات العلمية والمحاكاة، صارت إعادة الحقن حالياً جزءاً من إدارة الحقل جنباً إلى جنب مع التخلص في البركة؛ في عام 2003، استخدمت تسعة آبار للحقن.

يتكون نظام التجميع من فواصل حلزونية في كل بئر مع خطوط بخار إلى رأس البخار في مركز الطاقة، وخطوط سائلة إلى بركة التبخير.



يظهر في هذا الشكل رأس البئر النموذجي M-114 الذي يخدم CP-I.

لقد جرى توفير مولدات التوربينات للوحدات 1–4 بواسطة شركة توشيبا Toshiba. بعد وقت قصير من بدء تشغيل الوحدة 4، تقرر زيادة ناتج المحطة عن طريق تسريع محلول ملحي في عملية من مرحلتين لإنتاج تدفقين إضافيين للبخار. لن يتطلب ذلك آباراً إضافية، وسيزيد من كفاءة استخدام المحطة بشكل عامٍ.

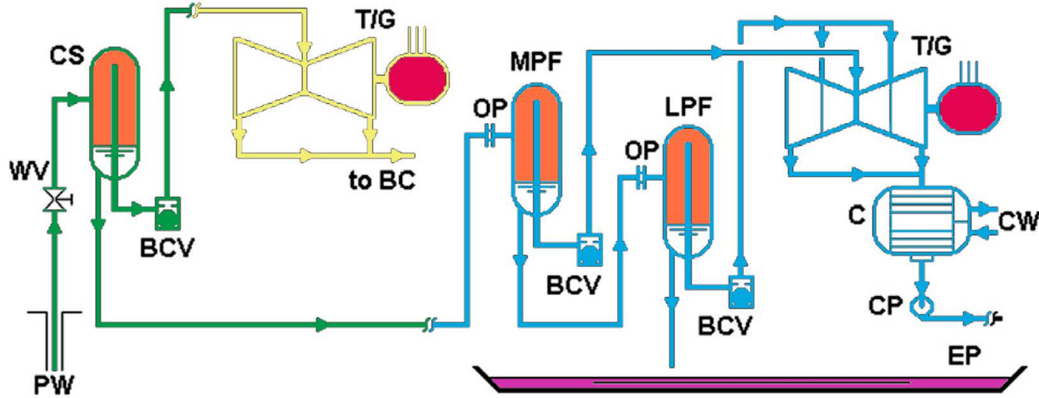




يوضح الشكل قمة البخار وفواصل الرطوبة خارج محطة الطاقة CP-I. حيث يصل البخار المنفصل من CP-I عبر خطوط الأنابيب من اليمين، ويدخل قمة البخار، ويمر عبر مزيل الرطوبة قبل دخوله إلى التوربين. لاحظ المكثفات البارومترية في الجزء الخلفي الأيسر والمداخن الطويلة التي تقوم بتفريغ الغازات غير القابلة للتكثيف مع كمية صغيرة من البخار.

تعتبر الوحدة 5 تصميماً حقيقيّاً للبخار السريع الثنائي حيث يجري تغذيتها بالسائل في ظروف مشبعة بشكل أساسي وتنتج بخاراً بضغط متوسط ومنخفض لتشغيل التوربينات ذات الإدخال المزدوج. تم توفير التوربين من قِبَل شركة Mitsubishi Heavy Industries، Ltd.

مع أن كفاءة استخدام الوحدة 5 بحد ذاتها تبلغ 31.7 % فقط، مقارنة بـ 34.5 % لكل وحدة من وحدات البخار السريع الواحدة، إلا أنه بإضافة الوحدة 5، زادت كفاءة الاستخدام للمحطة بكاملها إلى 41.4 %، وهو مثال على التآزر في التصميم.



مخطط تدفق مبسط للوحدات 1-5 سيرو بريتو I. يمثل الجانب الأيسر كل وحدة من 1-4؛ يظهر الجانب الأيمن الوحدة 5.

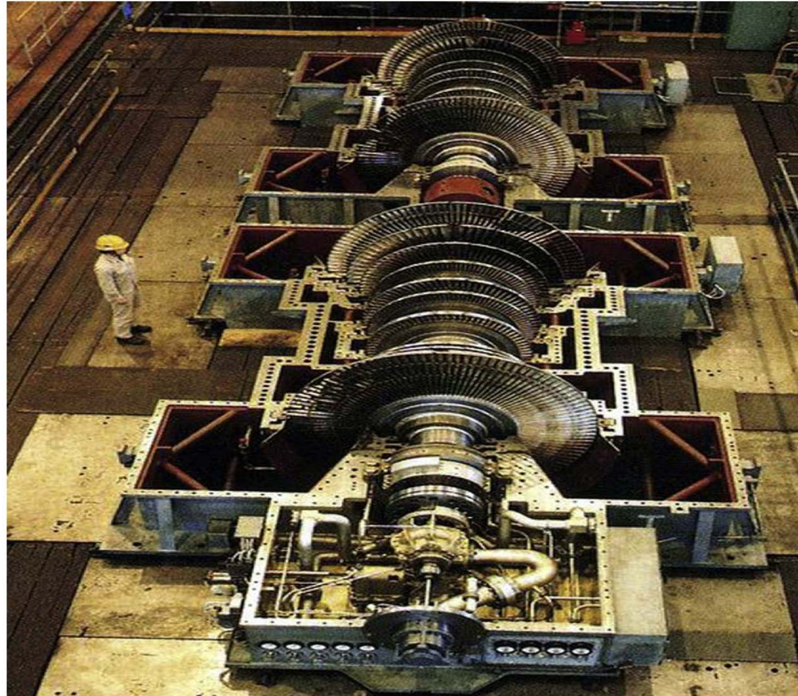
نظراً لأن الوحدة 5 تعتمد على الإمداد المستقر لمحلول ملحي للنفايات من فواصل الوحدات 1–4، إذا تغيرت هذه الكمية خلال سنوات التشغيل، فإنها ستؤثر في توازن البخار الذي يمكن توفيره للوحدة 5. في الواقع ضغط الخزان انخفض وزاد جزء البخار عند فوهة البئر، تاركاً محلولاً ملحيّاً أقل لوحدة البخار السريع الثنائية.

في عام 2003، بينما كانت الوحدات 1–4 قادرة على العمل بعامل قدرة 87.5 %، يمكن للوحدة 5 إدارة 13.1 % فقط. الخطط جارية حالياً لنقل محطة التسريع من بجوار بركة التبخر، ولجعل اثنين منها أقرب إلى حقلي البئر CP-II و CP-III من أجل استخدام محلول ملحي للنفايات بالإضافة إلى بخار الضغط المنخفض الزائد من تلك المصانع لإعادة الوحدة 5 إلى ناتجها المقدر.



2. سيرو بريتو II و سيرو بريتو III الوحدات 1-2

تتألف الوحدات الأربع اللاحقة التي ستطرح في سيرو بريتو من وحدات متطابقة تبلغ 110 ميغاواط، تقع اثنتان في وحدات طاقة منفصلة تسمى (CP-II) و(CP-III). التوربينات هي أكبر آلات البخار السريع الثنائية في أي محطة للطاقة الحرارية الأرضية، وقد جرى بناؤها من قِبَل شركة توشيبا. يحوي التوربين على أسطوانات، مرتبة بشكل ترادفي، ولكل منها مسار بخار ثنائي التدفق. الدوارات قابلة للتبديل، بثلاث مراحل (ضغط مرتفع) HP وأربع مراحل (ضغط منخفض) LP لكل تدفق. التوربين مزود بمزيلات الرطوبة بين المراحل لتقليل التآكل من البخار الرطب.



الدوار التوربيني لكل وحدة 110 ميغاواط في CP-II و CP-III في محطة توشيبا.

يأتي بخار هذه التوربينات من فواصل رأس البئر والمسرّعات، وزوج واحد لكل بئر. ومن ثم، هناك أنابيب تشغيل للبخار عالي الضغط ومنخفض الضغط من كل بئر يخدم هذه الوحدات. في ساحة محطة الطاقة، يمر البخار عبر مزيلات الرطوبة الكبيرة قبل دخول التوربينات.

الميزة الفريدة لهذه الوحدات هي استخدام ضواغط توربينية تعمل بالبخار، T / C، لإزالة الغازات غير القابلة للتكثيف من المكثفات. يستخدم تيار جانبي من بخار HP لتشغيل وحدتي ضاغط توربيني، واحدة لكل مكثف، ويجري تغذية بخار العادم مرة أخرى في خط بخار LP لاستخدامه في مراحل LP من التوربينات. يسهم هذا التصميم المبتكر في زيادة كفاءة استخدام هذه الوحدات، وهي 49.3٪.

في عام 2003، كان معامل قدرة محطات CP-II و CP-III تبلغ 78.4 % و 82.7 % على التوالي.

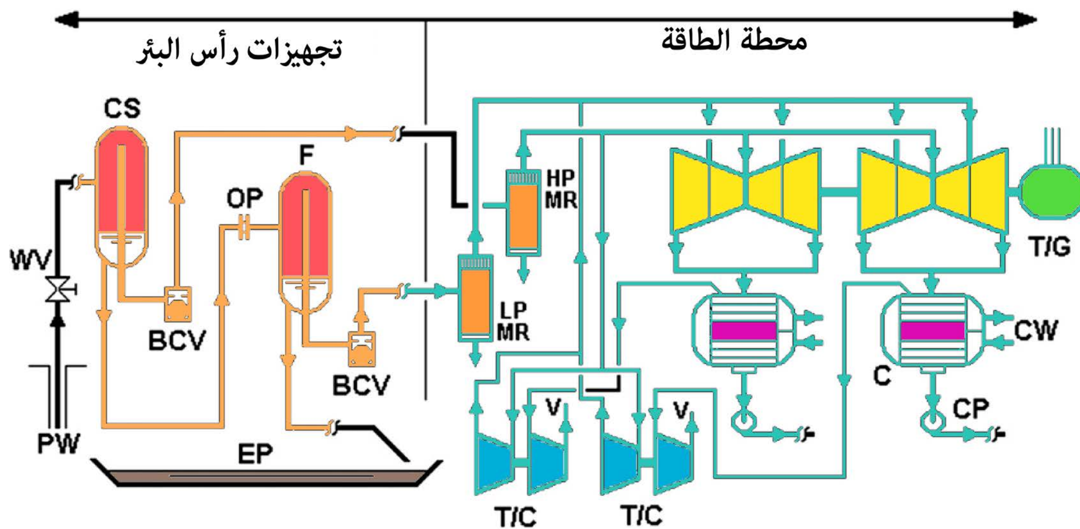
3. سيرو بريتو IV الوحدات 4-1

الوحدات الأخيرة التي سيجري إضافتها إلى محطة الطاقة سيرو بريتو هي (CP-IV) وتتألف من أربع وحدات متطابقة 25 ميغاواط أحادية البخار السريع. تقع محطة الطاقة إلى الشرق من الوحدات السابقة وتسحب السوائل الأرضية من أعمق جزء من الخزان.

جرى توفير مجموعات المولدات التوربينية بواسطة شركة توشيبا؛ بدأت جميع الوحدات الأربع في عام 2000، واحدة في كل شهر بدءاً من مارس وأبريل ويونيو ويوليو. في حين تصنف كل وحدة اسمياً على أنها 25 ميغاواط صافية للطاقة، فإن ميتسوبيشي تقدر كل واحدة منها عند 26.95 ميغاواط، إجمالي،

مـع قـدرة قصـوى تبلـغ 28.15 ميغـاواط. وقـد كان لمحطـة CP-IV بكاملهـا عامـل قدرة 93.9 % في عام 2003.

بشـكل عـامٍّ، أظهـرت جميـع وحـدات سـيرو بريتـو انخفاضـاً في الأداء مقارنـة بمواصفـات التصميـم. وأظهـرت البيانـات مـن عـام 2008 أن إجمالـي اسـتهلاك البخـار النوعـي (SSC) لنظـام سـيرو بريتـو قـد ارتفـع إلـى 2.45 كـغ/ ثانيـة لـكل ميغـاواط مقارنـة بمتوسـط الطاقـة المرجـح لـ SSC البالـغ 1.94 كـغ/ ثانيـة لـكل ميغاواط، ضعف الأداء بنسبة 26 % تقريباً.



مخطط تدفق مبسط لوحدتي سيرو بريتو II و III.

4. توسعة سيرو بريتو والآفاق القريبة

في الوقت الحالـي، جـرى تعليق المزيد مـن التوسـع في حقل سـيرو بريتـو؛ يجـري حاليـاً حفـر آبـار البنيـة فقـط. الحيـاة النموذجيـة لبئـر في سـيرو بريتـو هـي مـا يقرب من عشر سنوات، مع العمل الإضافي في نحو 4–5 سنوات.

على مدى 35 عاماً انتهت في نهاية عام 2008، حُفر 369 بئراً في سيرو بريتو بعمق إجمالي يبلغ 868.4 كم، مما يعطي متوسط عمق بئر يبلغ 2353 متراً. أعمق بئر 4400 متر في العمق. خلال عام 2008، كان هناك 167 بئراً إنتاجية نشطة، توفر 1451 كغ / ثانية من البخار إلى 13 وحدة طاقة، بمتوسط 8.69 كغ/ ثانية لكل بئر. هذا هو 25 % أقل من معدل الإنتاج قبل خمس سنوات. جرى تشغيل ثلاث عشرة بئر حقن في عام 2008، بإرجاع 31 % من إجمالي المحلول الملحي المفصول (19.6×10^9 كغ مقابل 63.0×10^9 كغ).

إرسال 43.4×10^9 كغ المتبقية من محلول ملحي إلى بركة التبخير التي نمت إلى 14.3 كيلومتر مربع بحلول نهاية عام 2008. في عام 2011، استجابةً للمخاوف التي أعرب عنها السكان القريبون، أعلنت CFE عن مشروع بقيمة 72.6 مليون دولار أمريكي لتقليل حجم البركة وتنفيذ برنامج مراقبة ودراسة الأثر البيئي للتأثيرات المحتملة للبركة.

بناءً على الدراسات السابقة، هناك العديد من الاحتمالات الأخرى للطاقة الحرارية الأرضية في المنطقة العامة لسيرو بريتو التي جرى استكشافها إلى مستوى الجدوى المسبقة. أوصت هذه الدراسات بإجراء الحفر في أكثر المواقع الواعدة، بما في ذلك تولشيك Tulicheck وريتو Ri´ıto وأيروبورتو Aeropuerto ولاغونا سالادا Laguna Salada وبيسكادوريس Pescadores وغوادالوب فيكتوريا Guadalupe Victoria وناياريتا Nayarit.

يقع تولشيك على بُعد نحو 27 كم شمال غرب سيرو بريتو، داخل وادي مكسيكالي. تقع ريتو على بُعد نحو 40 كم من سيرو بريتو في الاتجاه المعاكس، داخل دلتا نهر كولورادو. تقع غوادالوب فيكتوريا في منتصف الطريق تقريباً بين سيرو بريتو وريتو.

يقع أيروبورتو على بُعد نحو 27 كم شمال سيرو بريتو، بالقُرْب من المكسيك والولايات المتحـــدة. الحدود وغرب الصدع الإمبراطوري. تقع لاغونا سالادا وبيســـكادوريس على بُعْد نحـــو 20 كم من WSW في ســـييرا دي لوس كوكاباس Sierra de los Cucapahs. جرى تحديد كل هذه المناطق باستخدام المسوحات المغناطيسية والجاذبية، تليها دراسات الانعكاس الزلزالي والانكسار، بالتزامن مع درجات الحرارة المرتفعة التي لوحظت في آبار الري.

بالطبع، المنطقة الواقعة شرق حقل سيرو بريتو المستغل حالياً هي أيضاً فرصة ممتازة لتوسيع المورد. ومن ثمّ فإن منطقة باجا كاليفورنيا نورت لديها القدرة على إضافة 720 ميغاواط من الطاقة الكهربائية الحرارية الأرضية المثبتة بالفعل في سيرو بريتو.

• التجربة الثانية: محطة الكهرباء في هاتشوبارو، ولاية أويتا، كيوشو، اليابان

تقع جزر اليابان مباشرة على طول جزء من حلقة النار في المحيط الهادئ. وأجزاء كبيرة من الجزر الرئيسية في هوكايدو وهونشو وكيوشو التي تحتلها البراكين الرائعة. مع أن اليابان تضم نحو 0.3 % فقط من الأرض، إلا أنها موطن لـ 10 % من البراكين النشطة في العالم.

توجد موارد جوفية وفيرة لها نطاق واسع من درجات الحرارة والتطبيقات. ويعد الاستمتاع بالمنتجعات الحرارية جزءاً معروفاً من الثقافة اليابانية. لا ينبغي أن يكون مفاجئاً أن اليابان كانت من أوائل الدول التي جربت توليد الكهرباء من موارد الطاقة الحرارية الأرضية.

بدأت عمليات المسح المكثفة في عام 1918 لتحديد المناطق الواعدة لتطوير الطاقة الحرارية الأرضية، وشهد العام اللاحق حفراً ناجحاً لبئر بخار - بئر

تسورومي - في منطقة بوزوجيغوكو BozuJigoku في مدينة بيبو Beppu الشهيرة ذات الينابيع الساخنة في جزيرة كيوشو. في عام 1925، أنتج مولد كهربائي تجريبي صغير نحو 1.12 كيلوواط من بئر تسورومي.

بعد ذلك بعامين، حُفر بئر للطاقة الحرارية الأرضية بنجاح في أوتاكي، جنوب بيبو، ولكن لم يلتقط إمكانات البئر بسبب الحالة البدائية للتكنولوجيا في ذلك الوقت لتسخير قوة موارد الطاقة الحرارية الجوفية التي يهيمن عليها السائل.

خلال الخمسينيات وأوائل الستينيات من القرن الماضي، استمر الاستكشاف العلمي وحفر الآبار في منطقة أوتاكي. في عام 1951، جرى تركيب مولدة بقدرة 30 كيلوواط في مينامي تاتيشي في بيبو - مرفق هاكوريو التجريبي- باستخدام البخار من بئر جرى حفره حديثاً. تُوِّج كل هذا العمل في عام 1967 ببناء وتشغيل أول محطة تجارية للطاقة الحرارية الأرضية في اليابان باستخدام مورد يهيمن عليه السائل وهو محطة توليد الطاقة أوتاكي Otake التي تبلغ استطاعتها 12.5 ميغاواط.

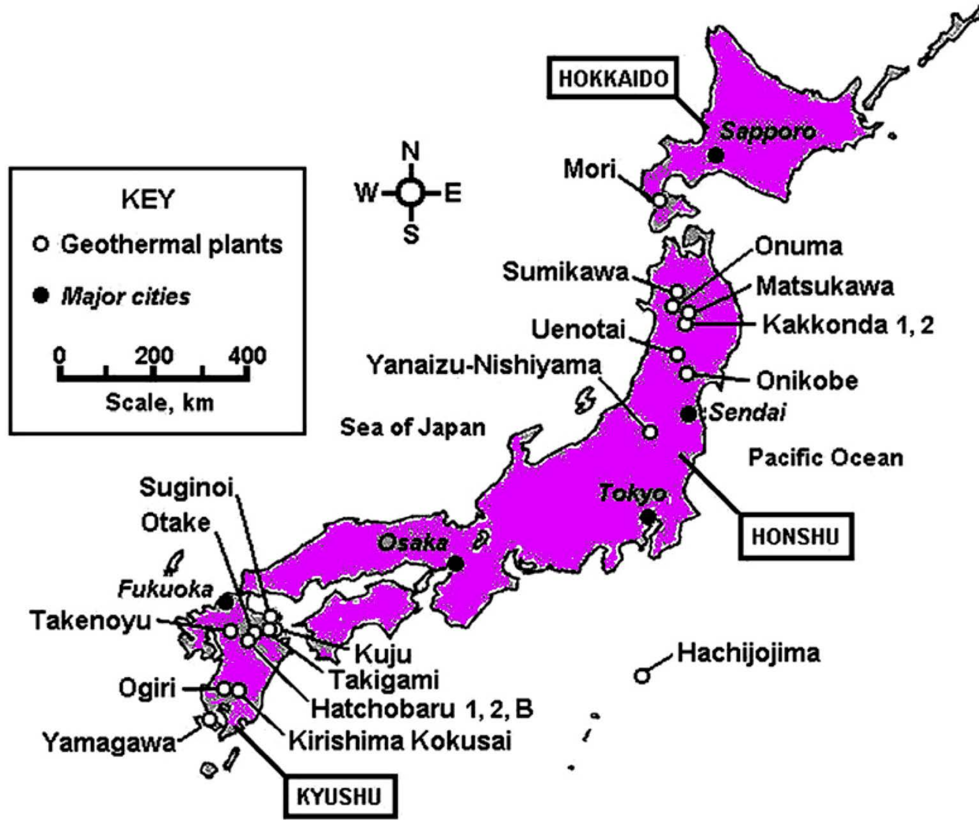


منشأة هاكوريو التجريبية في بيبو في عام 1951.

قبل عام واحد من بدء تشغيل محطة أوتاكي، قامت اليابان بتكليف أول محطة تجارية للطاقة الحرارية الأرضية، وهي محطة البخار الجاف بقدرة 23.5 ميغاواط في ماتسوكاوا. في ذلك الوقت من عام 1966، لم يكن هناك سوى موقعين آخرين في العالم بهما محطات طاقة حرارية جوفية تعمل بالبخار الجاف، وهما لارديللو في إيطاليا و The Geysers في الولايات المتحدة الأمريكية.

منذ ذلك الحين، اتبعت اليابان برنامجاً نشطاً لتطوير الطاقة الحرارية الأرضية نتج عنه 21 وحدة في 18 موقعاً مختلفاً في أكبر ثلاث جزر هونشو وهوكايدو وكيوشو بالإضافة إلى جزيرة هاتشيجوجيما الصغيرة.

إجمالي القدرة المركبة 535.26 ميغاواط، وهي جيدة بما يكفي لتكون الثامنة بين دول العالم. سجل نظام الطاقة الحرارية الأرضية الياباني عامل قدرة إجمالي قدره 65.3 % لعام 2007.



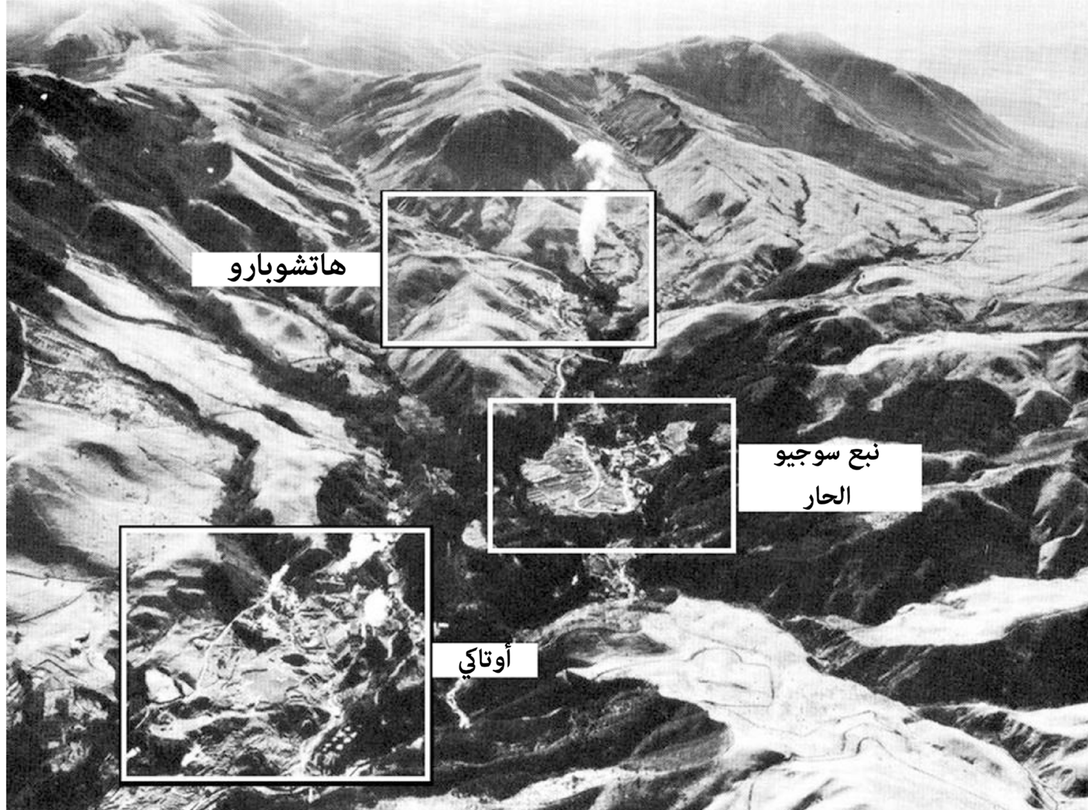
خريطة محطات الطاقة الحرارية الأرضية اليابانية حتى يوليو 2004.

2. حقل هاتشوبارو الحراري الأرضي

أ. الوضع الجيولوجي

تقع هاتشوبارو داخل حديقة آسو الوطنية، ومن ثم فهي تخضع لضوابط صارمة على مواقع حفر الآبار، والتصريفات الجوية والسطحية، والضوضاء، والانحرافات البصرية عن المناظر الطبيعية. واحدة من جيرانها هي محطة أوتاكي لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية 12.5 ميغاواط، على بُعْد كيلومترين

فقط إلى الشمال. تقع قرية الينابيع الحارة سوجيو Sujiyu Hot Springs، وهي منطقة جذب سياحي شهيرة، في منتصف الطريق بين المحطتين.

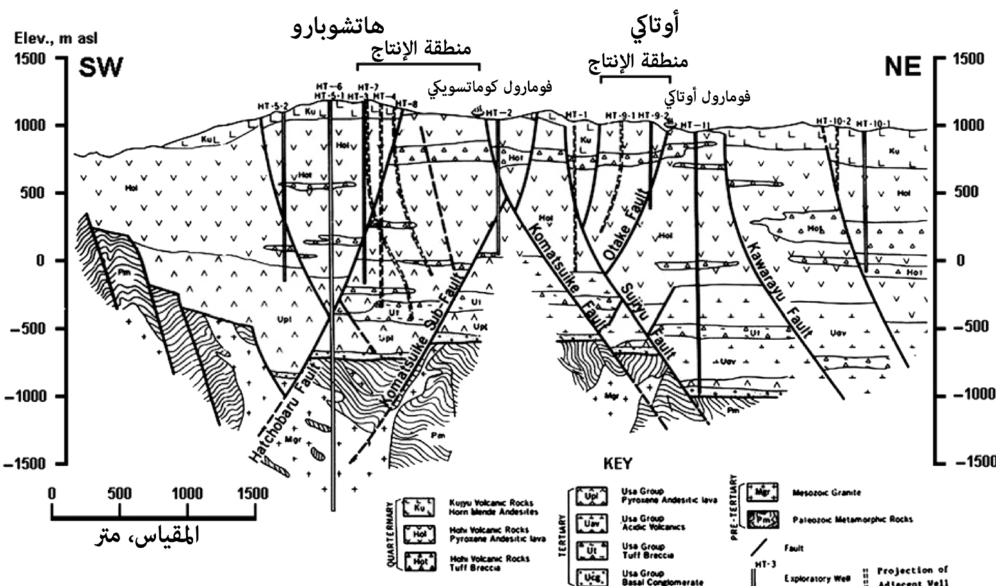


محطات توليد الطاقة الحرارية الأرضية في هاتشوبارو وأوتاكي وينابيع سوجيو الساخنة، تتجه عموماً نحو الجنوب. تبلغ المسافة بين محطتي الطاقة نحو 2 كم.

كما سنرى، أدت هذه الظروف دوراً مُهمّاً في تطوير وصيانة الطاقة من محطات هاتشوبارو.

كما تظهر صورة الموقع الجوي، فإن حقل هاتشوبارو محصور بشكل ضيق

داخل التضاريس الوعرة التي تشكل سلسلة جبال كوجو. تتميز المنطقة بالعديد من صدوع NNW-SSE الرئيسية التي تتجه إلى الانحدار الحاد التي يبدو أنها تربط خزان هاتشوبارو. يوجد أيضاً صدوع متعامدة في القطاع الجنوبي الشرقي يبدو أنها تؤدي دوراً رئيسياً في جلب المائع الأرضي الساخن من مصدره نحو السطح.



مقطع عرضي جيولوجي لحقول هاتشوبارو-أوتاكي. في هذه المحطة، تتمثل العيوب الرئيسية في التحكم في السوائل في حقل هاتشوبارو في صدع هاتشوبارو وصدع كوماتسويكي الفرعي، وكلاهما ينخفض بشدة إلى الجنوب الغربي.

صدع كوماتسويكي Komatsuike، الذي أدى إلى ظهور فومارول كوماتسويكي البارز المجاور لموقع محطة هاتشوبارو، ينخفض في الواقع إلى الشمال الشرقي ويشكل حدّاً منزلقاً عبر صدع كوماتسويكي الفرعي. على هذا النحو، فإن السائل الساخن المتصاعد على طول صدع كوماتسويكي الفرعي ربما يكمل رحلته إلى السطح على الجزء العلوي من صدع كوماتسويكي.



لقد عثر على النفاذية والإنتاج بشكل عامٍّ في جدران القدم لصدوع التحكم في السوائل، وهي قريبة نسبيّاً من الصدوع. وقد أدى هذا إلى توجيه استهداف آبار الإنتاج. نفاذية الصخور التي تشكل التكوين منخفضة بينما يُظهر الخزان اتصالاً أفقيّاً عالياً جدّاً على طول الصدوع المذكورة أعلاه. تقع صخور القبو على عمق نحو 1750 متراً تحت مستوى سطح الأرض في هاتشوبارو حيث عثر على درجات حرارة تبلغ نحو 300 درجة مئوية.

ب. الإنتاج وإعادة الحقن

إن تحديد مواقع الآبار للإنتاج وإعادة الحقن مقيد بشدة بسبب الحجم المحدود للحقل. بشكل عامٍّ، فإن أفضل مكان للإنتاج هو الجزء الجنوبي الشرقي من الحقل، بينما يعاد الحقن في أقصى الشمال قدر الإمكان لتجنب التداخل مع آبار الإنتاج. نظراً لأن تدفق الخزان الطبيعي السائد يكون من الجنوب الشرقي إلى الشمال الغربي، فإن آبار إعادة الحقن تقع في منطقة التدفق الخارجي للخزان.

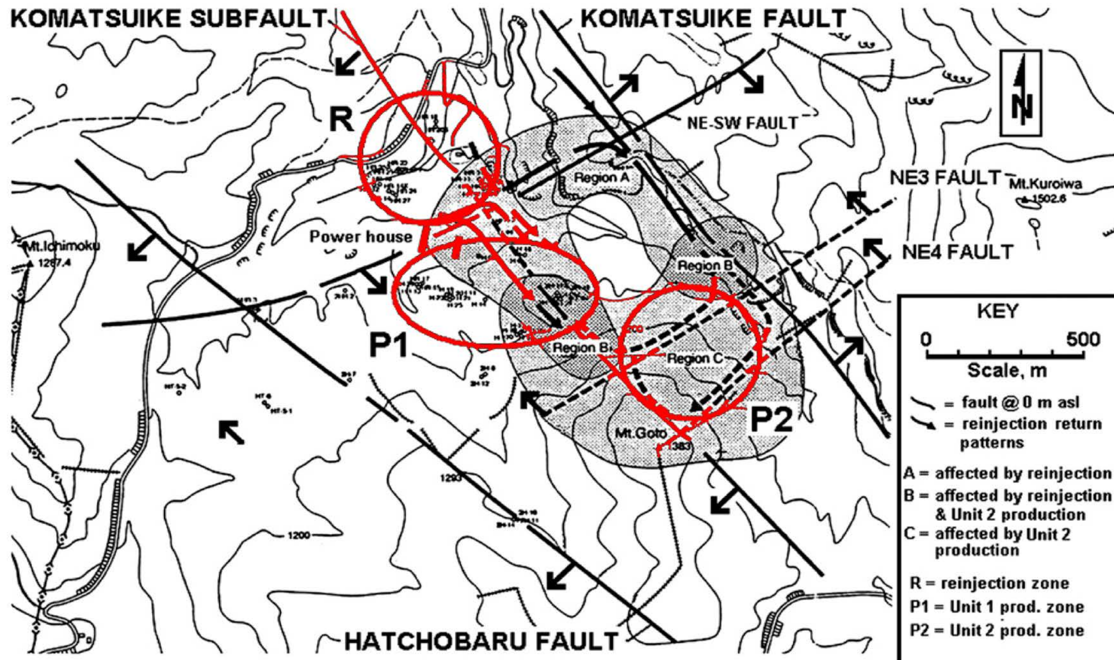
ومع ذلك، فإن فرق الضغط الذي يحرك تدفق السوائل يضطرب عندما يحدث الإنتاج في وقت واحد مع إعادة الحقن. الأول يقلل الضغط في الجزء الساخن من الخزان بينما يزيد الأخير الضغط في المنطقة الباردة. سمح انعكاس الضغط هذا للحقن البارد بالعودة إلى منطقة الإنتاج وتسبب في زوال بعض آبار الإنتاج الممتازة سابقاً، ولا سيما بئر H-4.

عندما اختبر البئر H-4 عند الانتهاء من الحفر في عام 1973، كانت قادرة على توليد 18 ميغاواط، وهي بئر مثيرة للإعجاب فعلاً. بحلول الوقت الذي جرى توصيلها بالمحطة في عام 1977، انخفضت إلى نحو 13 ميغاواط، وهي كمية ممتازة جدّاً.




من عام 1977 إلى عام 1980 خلال السنوات الثلاث الأولى من تشغيل المحطة، وإن كان بنصف حمولة، انخفض الإنتاج بشكل حاد إلى 1 ميغاواط، مما جعل البئر عديم الفائدة. خلال هذا الوقت، انخفضت درجة الحرارة في منطقة التغذية بنحو 50 درجة مئوية. كان من الواضح أن إعادة تدوير السوائل المحقونة تسبب في موت البئر.

يقع البئر H-4 إلى الشرق من محطة الطاقة، بشكل أساسي عند تقاطع صدع كوماتسويكي الفرعي وصدع NE-SW. كان على بُعد 240 متراً من أقرب بئر إعادة حقن، جرى قياسه على السطح، ولكنه كان على بُعد 140 متراً فقط من نقطة الإنجاز لبئر إعادة حقن محفور اتجاهيّاً، HR-14. أظهرت اختبارات التتبع سرعات عودة الحقن في أجزاء من الحقل تصل إلى 80 متر/ ساعة.



أنماط التدفق الظاهرة ناتجة عن إعادة الحقن في الجانب الشمالي من الحقل في عام 1995.



اعتباراً من عام 1996، كان هناك 28 بئراً إنتاجية تزود ما يصل إلى 710 كغ / ثانية من السوائل الأرضية إلى وحدتي طاقة 55 ميغاواط (16 للوحدة 1؛ 12 للوحدة 2)، و16 بئراً لإعادة الحقن (12 للوحدة 1؛ 4 للوحدة 2) قبول نحو 50 % من السائل المنتج.

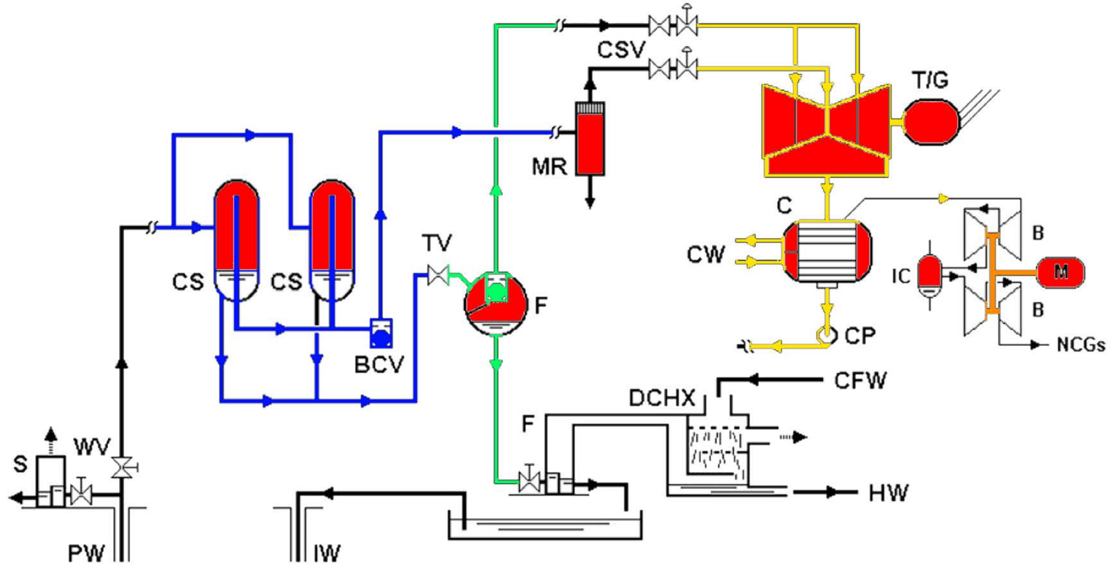
ت. وحدات طاقة هاتشوبارو

تتكون محطة الطاقة الحرارية الأرضية هاتشوبارو من ثلاث وحدات توليد:

- الوحدة 1، 55 ميغاواط، بخار سريع ثنائي، منذ 24 يونيو 1977.
- الوحدة 2، 55 ميغاواط بخار سريع ثنائي، منذ 22 يونيو 1990.
- الوحدة الثنائية، 2 ميغاواط، منذ 15 ديسمبر 2003.

1. وحدات بخار سريع ثنائية

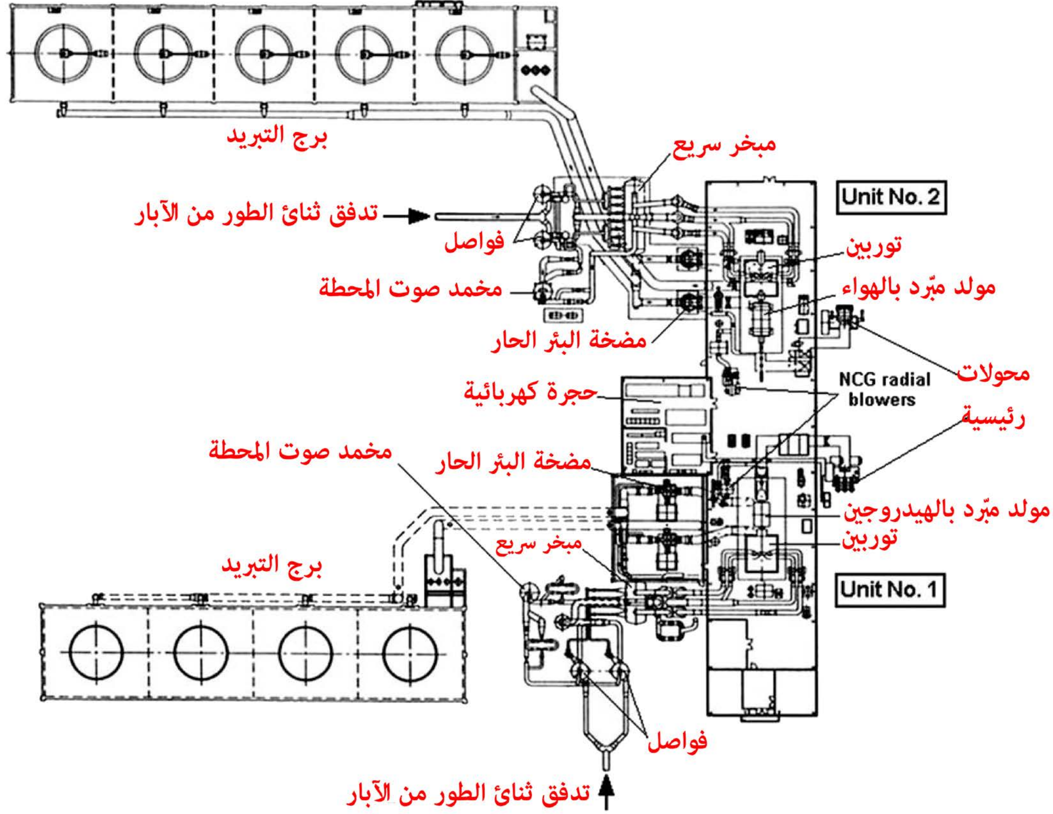
كانت وحدة هاتشوبارو 1 من بين أولى محطات الطاقة الحرارية الأرضية في العالم المصممة والمبنية على مبدأ البخار السريع الثنائي. جرى تشغيلها ووحدة كرافالا Krafla 30 MW في عام 1977. كانت المحطة متعددة البخار السريع في واياراكي، نيوزيلندا، تعمل منذ عام 1958، لكنها لم تكن وحدة بخار سريع ثنائية حقيقية. كانت الوحدة 2 عبارة عن نسخة طبق الأصل تقريباً للوحدة 1 مع بعض التحسينات الفنية استناداً إلى عشرات السنين من الخبرة التشغيلية مع الوحدة 1.



مخطط تدفق مبسط لوحدة هاتشوبارو 55 ميغاواط 2.

لا تحوي الوحدة 1 على مزيلات الرطوبة النهائية (مزيلات الرطوبة)، MR، لحماية التوربين من قطرات الرطوبة المحبوسة في البخار الرئيسي. على الرغم من أنه يُعرض نظام الاستخراج NCG منفاخ شعاعي فقط، فإنه يوجد أيضاً نظام قاذف نفاث للبخار احتياطي.

الفرق الآخر بين الوحدتين هو أن برج التبريد الخاص بالوحدة 2 يحوي على خمس خلايا بدلاً من أربع خلايا للسماح بأداء أفضل خلال أشهر الصيف الحارة. نظراً لأن المحطة مصممة للعمل بدون قائد من غرفة التحكم في محطة أوتاكي القريبة، فإن المولد الخاص بالوحدة 2 يتم تبريده بالهواء، بدلاً من تبريده بالهيدروجين، من أجل تشغيل أكثر موثوقية وصيانة أقل.



تصميم محطة هاتشوبارو 2 3 55 ميغاواط لتوليد الطاقة الحرارية الأرضية.

لتوفير مساحة في محطة الطاقة، تستخدم الوحدة 2 مضخات الآبار الساخنة المعلبة الرأسية بدلاً من المضخات الأفقية في الوحدة 1. وأخيراً، يعتبر التوربين الخاص بالوحدة 2 تصميماً متقدماً يشتمل على فوهات ملتوية وغطاء شفرة متكامل ينتج عنه تحسن بنسبة 7 % في كفاءة التوربينات بالنسبة للوحدة 1.

إن استخدام منصات الآبار مع حفر آبار متعددة بشكل مباشر يوفر بناء العديد من منصات الآبار في التضاريس الوعرة. مع الأخذ في الاعتبار مدى

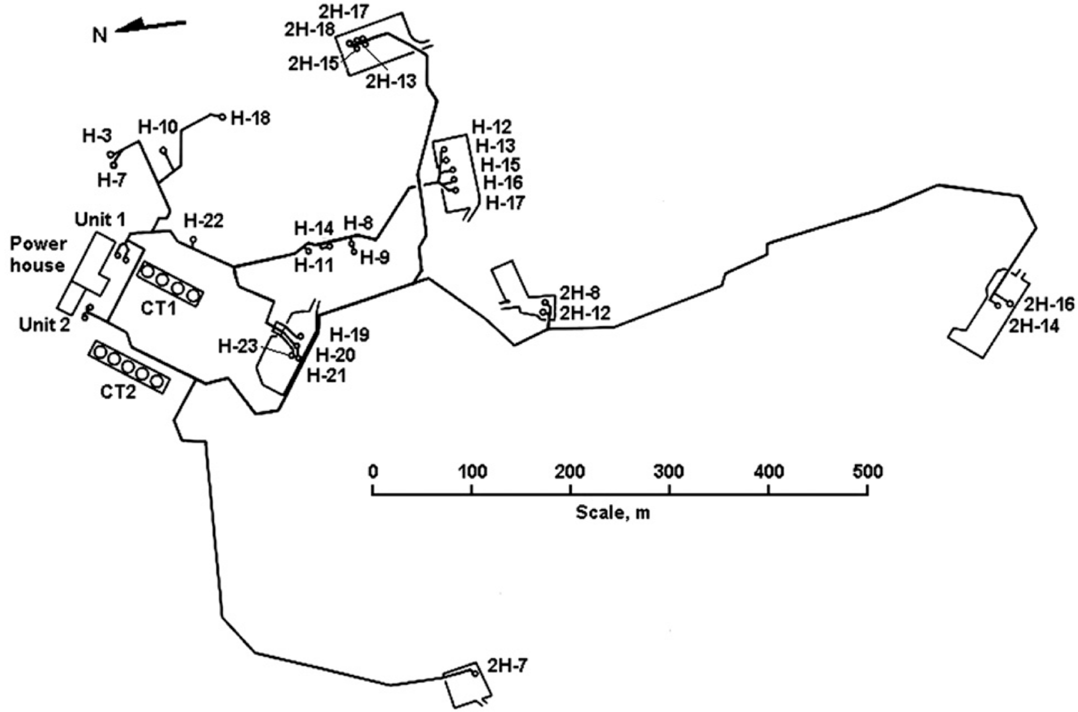


وصول الآبار الاتجاهية، فإن المنطقة التي تشملها جميع الآبار، والإنتاج وإعادة الحقن، لا تزال تصل إلى نحو 1.3 كيلومتر مربع فقط.



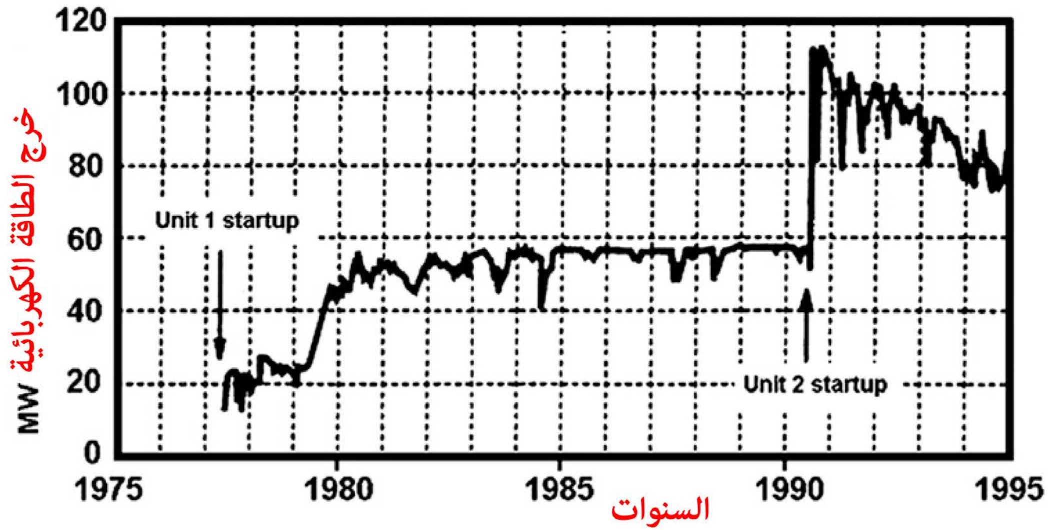
منظر جوي لمنشأة هاتشوبارو، بوجه عام ينظر إلى الجنوب. تقع منطقة كوماتسويكي فورومارول في الجانب الأيسر السفلي.

قد يرغب القارئ في مقارنة حقل هاتشوبارو بمجال ميرافاليس Miravalles. في ميرافاليس، تتحد الوحدتان 1 و 2 بقدرة 110 ميغاواط – مثل هاتشوبارو – لكن حقل البئر الذي يدعمهما، للإنتاج وإعادة الحقن، يغطي 15 كيلومتراً مربعاً على الأقل.



خريطة آبار انتاج محطة كهرباء هاتشوبارو عام 1992. من المقياس الموضح في الشكل يتبين لنا أنّ الآبار قد جرى حفرها في منطقة صغيرة نسبيّاً، أقل من 1 كم^2.

صارت صعوبة الحفاظ على إنتاج يبلغ 110 ميغاواط في هاتشوبارو واضحة بعد وقت قصير من بدء تشغيل الوحدة 2 في عام 1990. وصار من الواضح أن الوحدة 1 كانت قادرة على الوصول والحفاظ على تصنيف قوتها البالغ 55 ميغاواط بعد نحو ثلاث سنوات من بدء التشغيل، بمجرد الحصول على بخار كافٍ من برنامج الحفر. ولكن بعد فترة وجيزة من بدء تشغيل الوحدة الثانية، بدأت المشكلات.



تاريخ إنتاج الطاقة للوحدة 1 (1977–1990) والوحدتين 1 و 2 (1990–1995).

بعد الارتفاع الأولي إلى 110 ميغاواط، بدأ الإنتاج المشترك في الانخفاض المطرد بنحو 7 ميغاواط سنويّاً، وهو سبب خطير للقلق. نظراً لأن معظم الانخفاض كان مع الوحدة 1 التي كانت تغذيها الآبار في منتصف الحقل، بدلاً من الوحدة 2 التي جرى تغذيتها من الآبار الواقعة في أقصى الجنوب، فقد كان من الواضح مرة أخرى أن آبار إعادة الحقن في الطرف الشمالي من الحقل كانت تسبب المشكلة.

منذ ذلك الحين، جرى تنفيذ برنامج حفر لاستهداف صدوع NE4 وكوماتسويكي من أجل آبار إنتاج جديدة، ولحفر الآبار إلى الشمال لإعادة الحقن. جرى إرسال نحو ثلث المحلول الملحي من هاتشوبار لسنوات عديدة عبر خط أنابيب إلى حقل أوتاكي ليعاد حقنه هناك.



تتمثل إحدى ميزات هاتشوبارو والعديد من محطات الطاقة الحرارية الأرضية اليابانية في استخدام محلول ملحي لتسخين المياه للمجتمعات المحلية. يستقبل المبادل الحراري ذو التلامس المباشر، DCHX، الماء العذب البارد من نهر قريب وينتج ماءً ساخناً عن طريق مزجه بالبخار المنبعث من محلول ملحي للنفايات عند الضغط الجوي.



منشأة تسخين المياه الساخنة في منطقة هاتشوبارو. يظهر سخان المياه بالتلامس المباشر في المقدمة، بجوار بركة الترسيب.

الاستخدام المباشر للمحلول الملحي في المجتمع غير ممكن بسبب التركيزات العالية من الزرنيخ، 3 جزء في المليون. نظراً لأن البخار خالٍ عمليّاً من المعادن المذابة في المحلول الملحي، فإن الماء الساخن الذي يرسل إلى المجتمعات يكون ذا نوعية جيدة.



والنتيجة السلبية لمحطة الطاقة الخاصة بهذه الخدمة المجتمعية هي أن المحلول الملحي الذي يرسل لإعادة الحقن، بعد المرور عبر بركة ترسيب السيليكا، يكون عند نحو 90 درجة مئوية.

وبالمقارنة، فإن محلولاً ملحيّاً للنفايات لمحطة البخار السريع الفردي يتراوح عادة بين 140و165 درجة مئوية. أدى حقن الماء البارد نسبيّاً في خزان مع اقتران قوي على طول الصدوع الرئيسية إلى تفاقم مشكلة إعادة الحقن.

بالإضافة إلى ذلك، صارت بعض آبار الحقن مسدودة بالسيليكا التي تحمل المحلول الملحي والرواسب في التكوين، مما يقلل من النفاذية. نظراً لارتفاع درجة حرارة المائع الجيولوجي، يوجد تركيز عالٍ من السيليكا في المحلول الملحي الذي يزداد بشكل كبير خلال عمليات البخار السريع. ونتيجة لذلك، فإن محلول ملحي للنفايات يشبّع بشكل كبير فيما يتعلق بالسيليكا غير المتبلور ويضمن الترسيب. تعتبر بركة الترسيب إحدى الطرائق للتخفيف من المشكلة، ولكنها قد لا تقضي عليها تماماً.

المستفيد الرئيسي من المياه الساخنة المجانية هي بلدة الينابيع الحارة سوجيو المذكورة سابقاً. أشار تقييم أولي في عام 1983 لتأثير عمليات المحطة على الينابيع الساخنة إلى التقلبات الموسمية في إنتاج الينابيع.

ومع ذلك، أفيد مؤخراً أن الينابيع توقفت عن التدفق في وقت ما بعد بدء تشغيل محطات الطاقة الحرارية الأرضية. ومع ذلك، فإن المياه الساخنة التي تلقتها المدينة من محطة توليد الكهرباء قد سمحت للمنتجعات بالاستمرار في العمل وتوفير الحمامات الساخنة التي يتوقعها زوار سوجيو.



2. الوحدة الثنائية

كان اليابانيون يستكشفون استخدام المحطات الثنائية في حقولهم الحرارية الأرضية منذ السبعينيات. فقد جرى بناء واختبار وحدتين نموذجيتين 1 ميغاواط من 1977-1979، واحدة في نيجوريكاوا بالقُرب من موري في هوكايدو والأخرى في أوتاكي، على بُعد كيلومترين شمال هاتشوبارو. مع أن كلتا المحطتين كانتا تعملان بشكل جيد من الناحية الفنية، إلا أنه لم تتابع أي محطة تجاريّاً لأسباب اقتصادية.

في عام 2004، جرى تشغيل وحدة ثنائية 2 ميغاواط في هاتشوبارو. صممت هذه الوحدة لاستخدام بئر فرعية لا تمكن توصيلها بنظام التجميع الرئيسي. يفصل السائل ثنائي الطور عند فوهة البئر؛ يرسل البخار إلى مبخر الوحدة الثنائية، بينما يذهب المحلول الملحي المنفصل ومكثف البخار إلى جهاز التسخين المسبق.

نظراً لأن الوحدة يجري تبريدها بالهواء، فإنه يعاد حقن كل السوائل الأرضية من البئر بأقل تأثير على البيئة. جرى توفير الوحدة من قِبَل شركة أورمات Ormat، Inc.، وكما هو الحال مع وحدات البخار السريع الثنائية، فهي مملوكة لشركة كيوشو إلكتريك باور Kyushu Electric Power Co.، Ltd.

ستراقب المحطة عن كثب لمدة عامين، وإذا نجحت يمكن تكرارها في آبار أخرى غير تجارية تعمل بالطاقة الحرارية الأرضية.



وحدة ثنائية هاتشوبارو2 ميغاواط.



الطاقة الحرارية الأرضية ومشاركة المجتمع

مما لا شك فيه أن دور المجتمع حاسم في تشكيل المسار المستقبلي للتطورات في قطاع الطاقة الحرارية الأرضية. وسنناقش فيما يأتي بعض الطرائق التي يمكن أن تتماشى بها العلوم والتكنولوجيا في هذا المجال مع القيم والاحتياجات المجتمعية على طريق الانتقال المستدام نحو مستقبل منخفض الطاقة الكربونية. ويحدث ذلك من خلال تقديم موجز للأطر المفاهيمية المحتملة لتحليل التحول المجتمعي ومن خلال مناقشة بعض أدوات المشاركة العامة.



تحظى النظم البيئية الحرارية الأرضية بتقدير كبير من قِبَل المجتمعات كونها طبيعية وذات تأثيراً قليلة في البيئة.

• نُهج الابتكار والمجتمع المسؤول

الهدف من الحديث عن المشاركة العامة هو تحديد النُهُج والأطر المفاهيمية العلمية الاجتماعية بإيجاز كمساعدات في زيادة فهم العلاقة بين الطاقة الحرارية الأرضية والمجتمعات.

مع زيادة الضغط الاجتماعي والسياسي نحو تصميم مستقبل مستدام، لا سيما الانتقال نحو مستقبل عالمي منخفض الكربون، صار من الواضح أن الدور والمساهمات المحتملة للعلوم الاجتماعية قد أهملت إلى حدٍ ما في دراسات الطاقة.

يتطلب التعقيد المجتمعي الهائل لانتقال الطاقة، في هذه الحالة الطاقة الحرارية الأرضية، مع الرؤى المتغيرة من الجهات الفاعلة وأصحاب المصلحة، خبرات من مجموعة واسعة من التخصصات؛ من علوم الأرض والهندسة إلى الاقتصاد والعلوم الاجتماعية.

يمكن للعلوم الاجتماعية تقديم رؤى حول الأسئلة المجتمعية تماماً كما تقدم علوم الأرض والهندسة حول المزيد من القضايا التقنية والعلمية.

في كثير من الأحيان، كان دور العلوم الاجتماعية في دراسات الطاقة هو أولاً وقبل كل شيء هو ضمان أن تسود المنظورات التقنية الاقتصادية من خلال المساعدة في استيعاب السوق وضمان القبول الاجتماعي.

في الواقع، فإن الكثير من المؤلفات العلمية الاجتماعية حول الطاقة والمجتمعات تنشأ في دراسات حول إدارة الابتكار من وجهة نظر الصناعة أو الهندسة.



قدم الباحثون مفهوم المسؤولية الاجتماعية للشركات Corporate Social (CSR) Responsibility وناقشوا القضايا المختلفة مثل المعلومات والثقة التي تنشأ في تسخير كل من العمق والضحالة وموارد الطاقة، من وجهة نظر شركات الطاقة والتشعبات على نماذج الأعمال التي تطبقها.

بحكم التعريف، تميل المسؤولية الاجتماعية للشركات إلى التعبير عنها كاستراتيجيات مؤسساتية مدفوعة بالصناعة مع التفويض الأساسي لتلبية مصالح المساهمين، ويشير الباحثون إلى أن المفهوم يشمل أيضاً تلبية مصالح ووجهات نظر جميع أصحاب المصلحة. في السنوات الأخيرة، يتزايد الاهتمام بالتوجه نحو نماذج الأعمال التي تهدف إلى تعزيز الشرعية الاجتماعية بين أصحاب المصلحة.

لأكثر من عقد وحتى الوقت الحالي، يعمل الخبراء من جميع أنحاء العالم على نُهُج جديدة للابتكار من أجل مواءمة عمليات الابتكار بشكل أفضل مع احتياجات وقيم المجتمعات أو المجتمعات المحلية في عالم سريع التغير. يسير هذا الاتجاه جنباً إلى جنب مع زيادة الوعي بالمخاوف البيئية وعلى نطاق أوسع القضايا المتعلقة بالأخلاق والإنصاف، في ضوء «النضال من أجل حكم المشاعات».

إن الابتكار والعلوم والتكنولوجيا يفيض ويدفع باستمرار حدود الأُطُر المؤسساتية العلمية والمعيارية الحالية إلى الأمام ويتطلب «منتديات مختلطة جديدة» لمناقشة معقدة وديمقراطية وثرية حول الابتكار.

من بين هذه الأساليب المعاصرة، صار نهج «البحث والابتكار المسؤول» (RRI) Responsible Research and Innovation على سبيل المثال الذي أوضحه بوضوح المفوضية الأوروبية والسلطات العامة الأخرى بارزاً إلى حدٍ ما في السنوات الأخيرة.

إنها محاولة لإشراك المجتمع بشكلٍ أوسع، بما يتجاوز المساهمين وأصحاب المصلحة المباشرين، في عمليات التكنولوجيا والابتكار بهدف مواجهة التحديات المجتمعية الكبيرة، مثل الانتقال إلى مجتمع منخفض الكربون.

التعريف الأكثر استخداما لـ (RRI) هو أنه «عملية تفاعلية شفافة يصير من خلالها الفاعلون والمبدعون المجتمعيون مستجيبين لبعضهم بعضاً بهدف القبول (الأخلاقي) والاستدامة والرغبة المجتمعية في عملية الابتكار ومنتجاتها القابلة للتسويق (من أجل السماح بالتضمين الصحيح للتقدم العلمي والتكنولوجي في مجتمعنا)».

نهج (RRI) هو محاولة لصياغة تآزر جديد وشامل بين العلم والتكنولوجيا والمجتمع، وتشجيع المشاركة الأولية لجميع أصحاب المصلحة المعنيين. وتعني المشاركة التمهيدية أنه يجب بذل الجهود لضمان أن يصير المجتمع شريكاً في المشاركة في بناء مسار الابتكار من مراحل التخطيط الأولية وطوال التطورات بدلاً من السعي للحصول على موافقة الجمهور والقبول الاجتماعي فقط في المراحل النهائية من التطورات.

هناك أربعة أبعاد رئيسية على الأقل لـ (RRI)، التوقع، الشمول، الانعكاسية، والاستجابة. لأغراض هذا الفصل حول الطاقة الحرارية الأرضية والمجتمع، يمكن توضيح تلك الأبعاد وتبسيطها على النحو الآتي: محاولة توقع ما سيخبئه المستقبل من حيث الوعود والمخاطر؛ ولتشمل المجتمع الأوسع من خلال مشاركة المواطنين والمشاركة العامة ومجموعة من أنشطة التوعية؛ وأن تكون انعكاسية بمعنى أخذ جميع وجهات النظر في الاعتبار بدلاً من مجرد فرض جدول أعمال محدد مسبقاً في المداولات والأنشطة العامة؛ لتكون مستجيبة بمعنى دمج نتائج الأنشطة في تشكيل اتجاه الابتكار.

• تصور العلاقة بين الطاقة الحرارية الأرضية والمجتمع

يعتمد هذا القسم على مسارين متنوعين في أدبيات العلوم الاجتماعية حول الطاقة والمجتمع. الجزء الأول يميل نحو الجانب الاجتماعي، ويقدم ثلاثة نماذج متميزة من الأدبيات حول النظم الاجتماعية التقنية.

الجزء الثاني يميل أكثر نحو الدراسات حول العلوم والمجتمع بشكل عامٍّ، وقطاع الطاقة بشكل خاصٍّ، من منظور نفسي اجتماعي أكثر حيث يتحول تركيز التحليل نحو آراء عامة الناس والمجتمعات.

على أي حال، هناك اتجاه معين في الدراسات حول الابتكار والمجتمع، بما في ذلك انتقال الطاقة، إلى اعتبار المجتمع عقبة في طريق الابتكار السلس، بصفتها عقبات يجب التغلب عليها وهذا هو السبب الذي تُستدعى فيه العلوم الاجتماعية لإنقاذ الوضع.

يعتمد ذلك أيضاً على افتراض ضمني بأن معارضة الابتكار والتطوير فقط هي شيء يستحق البحث العلمي الاجتماعي.

إن الحماس الكبير للتكنولوجيا الجديدة هو على الأقل موضوع مُهمٌّ بالقدر نفسه من أهمية البحث الاجتماعي، حيث تؤكد الاضطرابات الحالية على شبكة التواصل الاجتماعي ذات الشعبية الكبيرة واستخدام البيانات التي يجري تسليمها بحرية من قِبَل المشاركين بوضوح.

هناك دائماً توتر مستمر بين الدفع التكنولوجي، حيث يجمع أصحاب المصلحة الذين هم عادة أكثر قوة الموارد لتعزيز أجنداتهم، والجذب الذي يأتي من أولئك الذين يطلبون التكنولوجيا الجديدة.

يبدو أن بعض مجالات الابتكار تمتزج بسلاسة في نسيج المجتمع، بينما تصير مجالات أخرى مثيرة للجدل ومسيسة جدّاً وتتطور إلى مشكلات مستعصية.

لقد سلم الملايين معلومات وبيانات شخصية جدّاً وحسَّاسة في كثير من الأحيان حول التفاصيل الخاصة لحياتهم إلى الشركات التجارية الكبرى دون تفكير، لكن الناس خرجوا وساروا في الشوارع احتجاجاً على الكائنات المعدلة وراثيّاً Genetically Modified Organisms (GMOs).

ما علاقة ذلك بالطاقة الحرارية الأرضية؟ الإجابة المختصرة هي أنه بالمقارنة مع بعض تقنيات الطاقة المتجددة الأخرى المعروفة، مثل: الرياح، والطاقة الشمسية، فإن الطاقة الحرارية الأرضية أقل شهرة بكثير وفي بعض الحالات يُنظر إليها على أنها يكتنفها عدم اليقين.

ولكن لم ترفض كما هو الحال بالنسبة للطاقة النووية. بالمقارنة مع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى، يمكن أن تناسب الطاقة الحرارية الأرضية وصف التقنيات ذات الإمكانات المثيرة للجدل.

سيخبرنا المستقبل، لكن عدم اليقين الشديد بشأن موارد الطاقة الحرارية الأرضية هو الذي يشكل دراسة علمية اجتماعية مثيرة للاهتمام. علاوة على ذلك، تميل التقنيات الناشئة والتحولات المجتمعية الرئيسية، على سبيل المثال نحو مستقبل منخفض الكربون، إلى مستويات جوهرية عالية من عدم اليقين وتؤكد الحاجة إلى حوار عامٍّ منطقي لتجنب تصور عملية صنع القرار غير العادلة والتكنوقراطية بعيداً عن هموم المواطنين.

يشير مصطلح النظم الاجتماعية التقنية Socio Technical Systems (STS) إلى مجموعة من المكونات التكنولوجية والاجتماعية التي تتفاعل في بيئة ما من



أجل تحقيق هدف محدد لا يمكن الوصول إليه حصريّاً عن طريق المكون التكنولوجي أو الاجتماعي الوحيد الذي يعمل.

بناءً على هذا التعريف، يمكن وصف أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية على أنها (STS) باعتبارها مسألة ابتكار في التكنولوجيا والأطر المؤسساتية والتنظيمية واستراتيجيات السوق والإعدادات التنظيمية والسلوكيات الجماعية والفردية. هنا نناقش بإيجاز ثلاثة نماذج مختلفة من (STS).

يعتبر نموذج المنظور متعدد المستويات انتقالات (STS) كنتيجة لربط التطورات على ثلاثة مستويات: المستوى الجزئي أو (مجالات الابتكار)، المستوى المتوسط (النظام الاجتماعي التقني المقصود به تجميع الجهات الفاعلة والشبكات والقواعد)، والمستوى الكلي (المشهد الاجتماعي التقني المقصود به أن يكون بيئة خارجية للأنماط الثقافية والاقتصادية والسياسية).

يعتمد النموذج الثاني على التفاعل المستمر والتشكيل المتبادل بين المكون التقني والاجتماعي وعلى رؤية التقنيات على أنها «... تكوينات اجتماعية وتقنية ظهرت بشكل عرضي في سياقات معينة التي تعكس اجتماعيّاً بشكل أوسع. والعلاقات والعمليات الاقتصادية والتقنية».

في النموذج، يُقصد من الأجهزة أن تُبنى اجتماعياً، بمعنى أنها ليست مجرد أشياء تقنية، ولكنها تقنية مادية وتنظيمية تهدف إلى توفير وظيفة/ خدمة. والبرنامج هو «... منظمة اجتماعية وبنية تحتية يجري من خلالها استخدام الأجهزة وإعطاء الغرض والمعاني». المنظمات البديلة و(STS) المختلفة الناتجة عن التجمعات المختلفة لمكونات الأجهزة والبرامج ممكنة دائماً.

يتصور نموذج الحكم الانعكاسي الجمع بين عمليتين أساسيتين. من ناحية



أخرى، العملية «المعرفية» للتقييم الاجتماعي، أو تحديد «طرائق المعرفة» الجهات الفاعلة في (STS) نفسها والتي قد تؤدي إلى منظور مختلف أو مشترك إلى حد ما حول الموضوعات التقنية العلمية؛ والعملية الأنطولوجية للالتزام الاجتماعي، أو تعريف «طرائق الوجود» الفاعلين فيما يتعلق بـ (STS) التي تمثل موقفهم وعلاقاتهم من ناحية أخرى. تحدد العلاقة المتغيرة بين عمليات التقييم / الالتزام نموذجاً للحكم ناتج عن الصراع بين نوعين مثاليين: الحوكمة في الخارج التي تهدف إلى العمل بناءً على (STS) من خلال المهام الآلية والإدارية، والحوكمة في الداخل المقصود منها أن تكون عملية التكييف والتكيف مع الشيء التقني العلمي نفسه (أي الانعكاسي).

تختلف النماذج الموصوفة أعلاه في تصورها لمكونات وديناميكيات (STS) ولكن تشترك في الأهمية المخصصة للمحاذاة والتطور المشترك بين أجزاء مختلفة من الأنظمة.

مع أن هذه النماذج هي أدوات مفاهيمية قيمة وتسلط الضوء على تعقيدات الأنظمة المشتركة التطور، على سبيل المثال الانتقال المجتمعي نحو مستقبل منخفض الكربون، إلا أنها لا تعطي الأولوية لمشاركة المواطنين وعمليات المشاركة العامة.

في مقال حديث، اقترح باتريك ديفين-رايت وزملاؤه إطاراً مفاهيميّاً جديداً لفهم القبول الاجتماعي للبنية التحتية للطاقة. يهدف المؤلفون إلى البناء على النموذج الكلاسيكي الحالي للقبول الاجتماعي للطاقة المتجددة وتحسينه من خلال إضافة منظور نفسي اجتماعي أكثر «يركز على دور أنظمة المعتقدات التي يتبناها الفاعلون الاجتماعيون المتنوعون، مثل: (صانعي السياسات والصحفيين وقادة المجتمع) و «ما لا يمكن فهمه دون أخذ العوامل السياسية

والاقتصادية والاجتماعية والثقافية والجغرافية في الاعتبار». مع أن هذا الإطار يطوّر في القضايا الناشئة المحيطة بمستقبل تخزين الطاقة، إلا أنه يبدو أنه مناسب إلى حد ما لقضية الطاقة الحرارية الأرضية أيضاً.

يعتمد نهجهم متعدد التخصصات على نظرية التمثيلات الاجتماعية التي يجري تصورها على أنها أنظمة من المعتقدات وعمليات الاتصال في المجتمع.

كانت نظرية التمثيلات الاجتماعية شديدة التأثير في علم النفس الاجتماعي المعاصر حيث نشأت في دراسات حول كيف يصير العلم والتكنولوجيا والابتكار جزءاً من المجتمع أم لا. ومن ثم فإن النظرية مناسبة بشكل خاصٍّ كإطار لتحليل التغير التكنولوجي ودور المجتمع في عمليات الابتكار وقد جرى تطبيقها في دراسات حول مجموعة من القضايا العلمية التقنية.

تشير الأبحاث من منظور نفسي اجتماعي، عبر مجالات وحالات متنوعة ذات مستوى عالٍ من عدم اليقين، إلى أن القول المأثور القديم «من تعرفه أفضل من الذي ستتعرف عليه» يميل إلى أن يكون صحيحاً. على الرغم من التبسيط الإجمالي، فإن هذا هو جوهر النظرية الاحتمالية الأنيقة القائلة بأن إدراك المخاطر يحمل وزناً أكبر من الفوائد المحتملة المتساوية. بعبارة أخرى، عندما تكون الفوائد المحتملة للابتكار أقل بروزاً من المخاطر المحتملة المتصورة، تقل احتمالية دعم التطورات المعنية.

علاوة على ذلك، فإن الثقة هي قوة فعَّالة في العلاقة بين المجتمع والابتكار. إذْ تصوّر الثقة على أنها تتكون من عنصرين مختلفين: الثقة المرتبطة بالكفاءة المتصورة، على سبيل المثال الموجهة إلى الجهات الفاعلة في انتقال الطاقة، والثقة الاجتماعية التي تتعلق بالقيم المشتركة مع تلك الجهات الفاعلة.



موسوعة العمري في علوم الأرض



المراجـــــــع

Boden, David R., (2016), **Geologic fundamentals of geothermal energy**, CRC Press, Taylor & Francis Group.

DiPippo, Ronald, (2012), **Geothermal Power Plants**, Third Edition, Elsevier Ltd.

K. Wali, Mohan, & Fatih Evrendilek, M. Siobhan Fennessy, (2010), **The Environment: science, issues, and solutions**, CRC Press is an imprint of Taylor & Francis.

Manzella, Adele, & Agnes Allansdottir, Anna Pellizzone, (2019), **Geothermal Energy and Society Editors**, Lecture Notes in Energy, Springe.

Renewable Energy: An Overview, (March 2001), **DOE/GO-102001-1102, FS175, National Renewable Energy Laboratory (NREL),** a DOE national laboratory.

Stober, Ingrid, & Kurt Bucher, (2013), **Geothermal Energy**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Turkenburg, Wim et al., (2012), **Renewable Energy**, Cambridge University Press.






موسوعة العمري
في علوم الأرض



أ.د. عبد الله بن محمد العمري

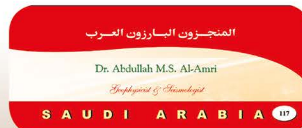
www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

المناصب الإدارية والفنية	❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا. ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود. ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي. ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الارضية بجامعة الملك سعود. ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض. ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود. ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS. ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية الأمريكية ومعهد ماكس بلانك الألماني.
الاستشارات والعضويات	● مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية. ● مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني. ● مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة. ● مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية. ● باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمه من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو. ● باحث رئيس في مشاريع مدعمه من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعمل ليفرمور الأمريكي LLNL. ● عضو الجمعية الأمريكية للزلازل. ● عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء. ● عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين. ● عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF. ● عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR. ● باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الامريكية. ● ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية. ● ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي. ● ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.
النشر العلمي والتأليف	❖ نشر أكثر من **200** بحثاً علميًا في مجلات محكمة. ❖ ألف **35** كتاباً علمياً. ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من **14** مجلداً و**107** ملفات علمية.
المشاريع البحثية	❁ **أنجز 40** مشروعاً بحثياً محلياً و **16** مشروعاً بحثياً دولياً و **74** تقريراً فنياً.
المؤتمرات والندوات	❁ شارك في أكثر من **125** مؤتمراً محلياً ودولياً و **75** ندوة وورشة عمل متخصصة.
التعاون الدولي	❁ باحث رئيسي في **13** مجموعة عمل أمريكية وألمانية.
الجوائز	❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م. ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم و التقنية عام 2006 م. ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007م. ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الاتحاد الامريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة الـ ISI. ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER. ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.
دروع التكريم	❖ حصل على **85** درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.





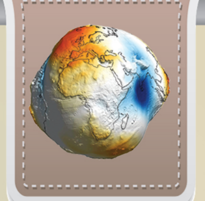









موسوعة العمري في علوم الأرض
Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



1 تقدير عمر الأرض

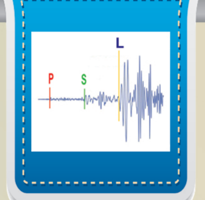
2 شكل الأرض وحركاتها

3 الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها

4 التركيب الداخلي للأرض

5 المعادن والتعدين

6 المد والجزر




7 موجات التسونامي

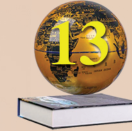
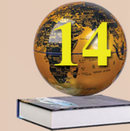
8 الزلازل والتفجيرات

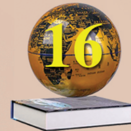
9 تقييم مخاطر الزلازل

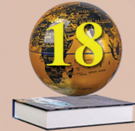
10 البراكين وسبل مجابهتها

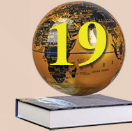
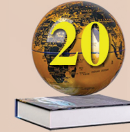
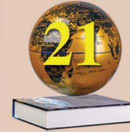
11 جيولوجية القمر

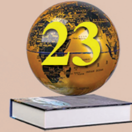
12 الأغلفة المحيطة بالأرض



13 المشاكل البيئية وحلولها

14 التغيرات المناخية والاحتباس الحراري

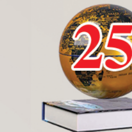
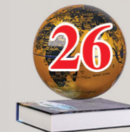
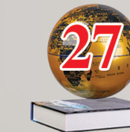
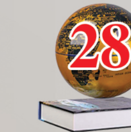
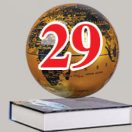
15 التشجير التحديات والحلول

16 الانزلاقات والانهيارات والفيضانات

17 الأمطار السيول والسدود

18 التصحر والجفاف



19 مستقبل الطاقة في عالمنا

20 الطاقة الحرارية الأرضية

21 هل انتهى عصر النفط؟

22 الجيوفيزياء النووية

23 الجيولوجيا الطبية

24 دليل كتابة الرسائل والنشر العلمي



25 321 سؤال وجواب في تطور الأرض

26 325 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء

27 358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية

28 380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية

29 303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية

30 300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية



www.alamrigeo.com
